



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ONLINE VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA VŘETENE
FRÉZOVACÍHO STROJE DATRON**

ONLINE VIBRATION DIAGNOSTICS OF THE DATRON MILLING MACHINE SPINDLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Kříž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Petr Kříž**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankovách, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Online vibrační diagnostika vřetene frézovacího stroje DATRON

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem diplomové práce je vytvoření komplexního systému online vibrační diagnostiky vysokootáčkového vřetene stroje DATRON. Řešení úkolu je zajištěno se spolupracující firmou.

Cíle diplomové práce:

Zhodnocení současného stavu technické diagnostiky stroje.
Analýza konstrukce a funkce vřetene pro účely diagnostiky.
Návrh systému měření vibrací pro online diagnostiku stroje.
Návrh hodnocení změn technického stavu vřetene.
Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

- VORLÍČEK, Z. Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991. 128 s. ISBN 80-01-00510-0.
- KREIDL, M. a ŠMÍD, R. Technická diagnostika. Senzory - metody - analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- HELEBRANT, F. a ZIEGLER, J. Technická diagnostika a spolehlivost, II. Vibrodiagnostika. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- LEGÁT, V. a kol. Management a inženýrství údržby. 1. vyd. Příbram: Kamil Mařík PBtisk, 2013. 570 s. ISBN 978-80-7431-119-2.
- JANKOVÝCH, R. Vibrační diagnostika odměrových mechanismů tanků. Habilitační práce. Brno, Vojenská akademie v Brně, 2004.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá online vibrační diagnostikou vřetene frézovacího stroje. Pojednává o zavedení komplexního systému online vibrační diagnostiky na zvolený stroj, návrhu systému měření vibrací a návrhu hodnocení změn technického stavu vřetene tohoto stroje. Součástí práce jsou i popis vibrační diagnostiky, popis konstrukce a funkce vřetene frézovacího stroje a doporučení pro praxi.

ABSTRACT

This master's thesis deals with online vibration diagnostics of the milling machine spindle. It is aimed at the implementation of the complex online vibration diagnostics system to chosen milling machine, the suggestion of the vibration measurement system and the suggestion of the evaluation of changes of the technical condition of this milling machine spindle. The description of the vibration diagnostics, the description of the milling machine spindle construction and function and the suggestions for the practical application of vibration diagnostics are also parts of this thesis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrační diagnostika, vřeteno frézovacího stroje, diagnostický systém

KEYWORDS

Vibration diagnostics, milling machine spindle, diagnostic system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘÍŽ, Petr. *Online vibrační diagnostika vřetene frézovacího stroje DATRON*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116911>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 10. 5. 2019

.....

Bc. Petr Kříž

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE.....	17
3	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY	19
3.1	Údržba	19
3.2	Technická diagnostika	20
3.3	Vibrace.....	20
3.4	Vibrační diagnostika.....	21
3.4.1	Budící síla.....	22
3.4.2	Měřené veličiny.....	24
3.4.3	Snímače pro měření vibrací.....	25
3.4.4	Měření a vyhodnocování vibrací strojů.....	30
3.4.5	Typy měření vibrací	31
3.5	Metody analýzy vibrací	32
3.5.1	Spektrální analýza signálu vibrací pomocí FFT.....	32
3.5.2	Měření a analýza fáze.....	34
3.5.3	Metoda obálky zrychlení	35
3.5.4	Měření a analýza obálky akustické emise (AEE).....	35
3.6	Nejběžnější závady odhalitelné vibrační diagnostikou	36
3.6.1	Nejběžnější závady rotačních strojů.....	36
3.6.2	Nejběžnější závady kluzných ložisek.....	38
3.6.3	Nejběžnější závady valivých ložisek.....	39
4	VŘETENO FRÉZOVACÍHO STROJE.....	41
4.1	Funkce vřetene frézovacího stroje	41
4.2	Konstrukce vřetene frézovacího stroje	41
4.3	Vysokofrekvenční vřeteno Jäger	42
4.3.1	Ložiska vřetene Jäger	43
5	ONLINE SYSTÉM VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY	47
5.1	Představení společnosti a diagnostikovaného zařízení.....	47
5.2	Současný stav technické diagnostiky stroje.....	48
5.3	Popis online systému vibrační diagnostiky	50
5.3.1	Hlavní komponenty Systému	52
5.3.2	Umístění snímačů.....	53

5.3.3	SKF @ptitude Observer	54
5.3.4	Testovací databáze	55
5.3.5	Měřicí body	59
6	VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ SYSTÉMU NA STROJI 1	61
6.1	Zrychlení vibrací.....	63
6.2	Rychlost vibrací.....	67
6.3	Obálka zrychlení vibrací.....	70
7	ZAVEDENÍ ONLINE VIBRODIAGNOSTIKY NA STROJI 2	73
7.1	Upevnění snímačů	73
7.2	Měřicí databáze.....	76
7.3	Stanovení provozních mezí vibrací	78
7.3.1	Srovnání hodnot vibrací při různých výrobních operacích	78
7.3.2	Metoda 30MAX.	82
7.4	Výsledky online vibrační diagnostiky na stroji 2	86
7.4.1	Analýza celkových hodnot vibrací	86
7.4.2	Analýza obálky zrychlení.....	89
7.4.3	Analýza zachycených událostí	90
8	DOPORUČENÍ PRO PRAXI	93
8.1	Rodný list diagnostikovaného zařízení.....	93
8.2	Opakovatelné podmínky	93
8.3	Testovací nástroj.....	93
8.4	Umístění diagnostikovaného strojního zařízení	94
8.5	Zálohování databáze	94
9	ZÁVĚR.....	95
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	97
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	99
11.1	Seznam obrázků	99
11.2	Seznam tabulek	100
11.3	Seznam symbolů	101
11.4	Seznam zkratk	101
12	SEZNAM PŘÍLOH	103

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zaměřuje na vytvoření komplexního systému online vibrační diagnostiky vysokootáčkového vřetene frézovacího stroje. Tento systém by měl poskytovat možnost neustálého monitorování stavu stroje a tyto informace předávat technickému diagnostikovi.

Každé technické zařízení během svého životního cyklu projde několika etapami – od etapy koncepce a stanovení požadavků, přes etapy návrhu, vývoje, výroby a instalace až po hlavní etapu – provoz a údržbu. Poté již následuje poslední etapa – vypořádání a likvidace. Technická diagnostika slouží k co největšímu prodloužení etapy provozu stroje (pomocí bezdemontážních a nedestruktivních technik zjišťování stavu zařízení), protože právě tato etapa životního cyklu je pro provozovatele stroje klíčová. V současnosti je jednou z nejpoužívanějších metod diagnostiky právě vibrační diagnostika, protože většina problémů se projevuje zvýšenými vibracemi zařízení.

Oproti běžně praktikované vibrační diagnostice (OFF-LINE diagnostice, která spočívá v pochůzkovém měření strojů a vyhodnocování spekter vibrací) má online vibrační diagnostika tu výhodu (jak již napovídá samotný název), že ji lze provádět dálkově. Diagnostik tedy u výrobního stroje připojí senzory a připraví vybavení (senzory jsou trvale propojeny s počítačem, který signály ze snímačů získává skrze ústřednu), ale samotnou diagnostiku provádí pomocí softwaru na dálku – v tomto případě z budovy FSI. To je pohodlnější jak pro něj, tak pro provozovatele technického zařízení. Aplikace online diagnostiky je však vhodná především u významných či drahých strojních zařízení. [1]

Diplomová práce je rozdělena do devíti kapitol, přičemž první kapitola je úvodní, druhá pojednává o motivaci a devátá obsahuje závěr celé diplomové práce.

Ve třetí kapitole práce jsou popsány vibrace, technická diagnostika, údržba a také je v ní pojednáno o vibrační diagnostice celkově.

Ve čtvrté kapitole se práce zaměřuje na vřeteno frézovacího stroje, zejména na jeho ložiska, protože ta jsou z hlediska vibrační diagnostiky pravděpodobně nejvýznamnější částí.

V páté kapitole je popsán online systém vibrační diagnostiky, včetně návrhu měřicích směrů pro online diagnostiku stroje (testovací databáze). Součástí této části je i zhodnocení současného stavu technické diagnostiky stroje.

V šesté kapitole jsou popsány výsledky testování tohoto online systému vibrační diagnostiky (dále jen Systém) provedeného za účelem zjištění jeho funkčnosti a také bezproblémovosti přenosu dat.

V sedmé kapitole je popsáno zavedení systému online vibrační diagnostiky ve zvolené firmě, včetně návrhu hodnocení změn technického stavu vřetene (pomocí sledování trendu vibrací a provozních mezí, jejichž velikosti byly stanoveny statistickou metodou).

V osmé kapitole jsou uvedena doporučení pro praxi.

2 MOTIVACE

Zkoumání problematiky zavádění systému online vibrační diagnostiky, řešené v této diplomové práci, bylo iniciováno konkrétní situací z praxe. Pokud na strojních zařízeních není aplikována žádná údržba (případně jen reaktivní typ údržby), dochází k nepříjemným problémům, například i mezi výrobcem stroje a zákazníkem.

Životnost strojů, případně jejich součástí, je poté velmi negativně ovlivněna. Rozhodnutí o zavedení systému online vibrační diagnostiky (a obecně prediktivní údržby) může pomoci objasnit, co snižování životnosti částí (například vřeten) stroje způsobuje. Znalosti o stroji, získané pomocí online vibrační diagnostiky, mohou navíc pomoci problémům předejít.

Impulz k vypracování této diplomové práce dal projekt NOVÉ PŘÍSTUPY V MULTIPARAMETRICKÉ DIAGNOSTICE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VŘETEN STROJŮ DATRON, který je spolufinancován Evropskou unií. Účelem projektu je:

1. spolehlivé online sledování stavu vřeten strojů DATRON,
2. zachycení potenciálně nebezpečných událostí s možností následné analýzy,
3. hodnocení přesnosti obrábění pomocí parametrů geometrické přesnosti kontrolního obrobku.

Tato diplomová práce byla vypracována v rámci řešení tohoto projektu. Zaměřuje se zejména na první dva uvedené body. Systém online vibrační diagnostiky v ní byl zaveden na dvou CNC frézovacích strojích DATRON M8Cube, které využívají vysokofrekvenční vřetena s výkonem od 0,6 kW do 4 kW s až 60 000 ot./min. Distributorem těchto strojů je firma DATRON-TECHNOLOGY CZ s.r.o., která se zabývá prodejem a podporou CNC obráběcích strojů pro vysokorychlostní frézování neželezných kovů a plastů (a dalšími oblastmi, jako měření dynamiky vozidel aj.).

Dva stroje, kterými se zabývá tato diplomová práce, jsou stejného typu. Jsou to:

1. Stroj 1 - CNC frézovací stroj DATRON M8Cube ev. č. M1803986 ve firmě DATRON-TECHNOLOGY CZ s.r.o. (konkrétně v jejich obchodním centru v Brně). Stroj obsahuje vřeteno Weiss 4 kW. Na tomto stroji byla zkoušena funkčnost online systému vibrační diagnostiky.
2. Stroj 2 - CNC frézovací stroj DATRON M8Cube (ev. č. M1803073) ve firmě EMKO Case a.s. sídlící v Brně. Stroj obsahuje vřeteno Jäger 2 kW. Do tohoto stroje byl online systém vibrační diagnostiky aplikován (poté, co byla ověřena jeho funkčnost), aby na něm mohla být prováděna online vibrační diagnostika za reálného provozu v uvedené firmě.

Prvním z cílů diplomové práce bylo zhodnotit současný stav technické diagnostiky strojů. To bylo provedeno po konzultaci s techniky firmy DATRON. Zhodnocení mělo být provedeno s důrazem na vibrační diagnostiku, ale ta nebyla doposud využívána. Druhým z cílů bylo analyzovat konstrukci a funkci vřetene pro účely diagnostiky. To bylo provedeno za pomoci firmy DATRON, která poskytla několik defektních vřeten, která mohla být rozebrána a zkontrolována. Zaměřil jsem se hlavně na ložiska, protože ta jsou z pohledu vibrační diagnostiky nejdůležitější součástí vřetene. Bohužel se ale jedná o speciální typ ložisek GMN, vyrobený na zakázku pro firmu Jäger (do jejich vřeten). Výrobce byl proto vázán smlouvou s odběratelem a odmítl poskytnout hlubší konstrukční informace o nich.

Třetím z cílů diplomové práce byl návrh systému měření vibrací pro online diagnostiku stroje. Měřicí systém byl po navržení a po poradě s vedením firmy DATRON a vedoucím diplomové práce nejdříve odzkoušen na stroji 1 (který se nacházel kousek od budovy VUT FSI) – zde byla otestována funkčnost měření a funkce přenosu naměřených dat vibrací. Po úspěšném otestování byl tento měřicí systém zaveden do stroje 2, který se nachází na druhém konci Brna od budovy VUT FSI.

Čtvrtým z cílů byl návrh hodnocení změn technického stavu vřetene. Jako nejvhodnější metodu jsem navrhl metodu sledování trendu vibrací (jejich zrychlení, rychlost a obálku zrychlení). Navíc jsem pomocí statistické metody spočetl hodnoty provozních mezí vibrací, jejichž překročení by mohlo signalizovat zhoršení technického stavu vřetene.

Pátým z cílů bylo dodat doporučení pro praxi. Tato doporučení vyplynula ze zkušeností získaných během testování Systému na stroji 1 a jeho aplikování na stroji 2.

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY

Tato kapitola pojednává obecně o údržbě, technické diagnostice a vibracích. Navíc je v ní rozebrána vibrační diagnostika, např. měřené veličiny, používané snímače, metody analýzy aj.

3.1 Údržba

Vibrační diagnostika je součástí údržby strojů. Údržba je kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činnosti dozoru, zaměřených na udržení objektu ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. [2, 3]

Úlohou údržby je především [4]:

1. dosažení co možná nejvyšší produktivity - zajištěním nepřetržitosti provozu po dobu jeho navrhované životnosti (případně i delší), minimalizováním odstávek na údržbu a neustálým zlepšováním daného procesu,
2. optimalizování výkonnosti stroje,
3. zajištění bezpečnosti provozu.

Existuje několik typů údržby [2, 4]:

1. **Reaktivní údržba.** Při využívání tohoto typu údržby se vlastně praktikuje provoz do poruchy. Tedy není prováděna žádná údržba až do té doby, kdy nastane porucha (jev, spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci). Tento typ údržby lze využívat u malých, levných a zálohovaných zařízení (z důvodu snižování provozních nákladů), ale celkově není příliš vhodný.
2. **Preventivní údržba.** Typ údržby sestávající z pravidelných periodických kontrol, revizí a oprav. Doba do opravy je stanovena podle četnosti poruch podobných zařízení (MTTF – střední doba do poruchy). Cílem je předcházení poruchám. Problémem je to, že odhad doby mezi opravami může být obtížný. Strojní zařízení se může porouchat dříve (což může i přes aplikovanou údržbu vést ke zbytečným ztrátám), nebo naopak později (což vede ke zbytečným nákladům na opravu zařízení, které je v pořádku).
3. **Prediktivní údržba.** Při aplikaci tohoto typu údržby opravy stroje neprobíhají periodicky, ale probíhají tehdy, když je to vyžadováno stavem zařízení. Je tedy nutné sledovat tento stav během provozu. Výhodou tohoto přístupu je předcházení neplánovaným událostem a možnost naplánování odstávek zařízení na vhodnou dobu (např. když zařízení zrovna není využíváno). Mezi další výhody tohoto typu údržby patří zvýšení životnosti strojního zařízení a bezpečnosti, optimalizování hospodaření s náhradními díly aj.
4. **Proaktivní údržba.** Tento typ údržby souvisí s předchozím uvedeným typem, navíc ale zahrnuje i řešení základní příčiny zhoršení stavu zařízení. Definuje tedy nápravné akce, které se nezaměřují na aktuální symptomy závady, ale na zjištění a odstranění základní příčiny závady. Pro příklad: při poškození ložiska nedojde pouze k výměně ložiska, ale i k odstranění špatného ustavení stroje, které poškození ložiska způsobilo.

Vibrační diagnostika je především záležitostí prediktivního a proaktivního typu údržby.

3.2 Technická diagnostika

Technická diagnostika je obor zabývající se bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. [2]

Zabývá se třemi typy úloh: [2]

1. **Diagnóza** - jedná se o zjišťování technického stavu objektu v reálném čase.
2. **Prognóza** - je to předpovídání stavu objektu.
3. **Geneze** - jedná se o určení technického stavu, ve kterém se objekt diagnostiky nacházel v určitém čase v minulosti.

Aby objekt mohl být zkoumán některou z metod technické diagnostiky, musí splňovat dvě základní podmínky: [2]

1. Během svého provozního života se musí nacházet alespoň ve dvou navzájem se vylučujících stavech – provozuschopném a poruchovém.
2. Musí mít rozpoznatelnou funkční strukturu (rozdělení na jednotlivé prvky).

Pokud jsou tyto podmínky splněny, může být objekt podroben některé z metod technické diagnostiky. Jak již bylo zmíněno, v současnosti je jednou z nejpoužívanějších metod technické diagnostiky vibrační diagnostika. Mezi další metody technické diagnostiky patří např. diagnostika koncentrace, zvuková (hluková, akustická) diagnostika, termodiagnostika (měření teplot), tribodiagnostika (analýza maziva) aj. [2, 4]

Základním problémem diagnostiky je to, že je analyzována odezva na působící příčinu (nikoliv příčina samotná). V případě vibrační diagnostiky jsou touto odezvou vibrace. [2, 4]

3.3 Vibrace

Jak již bylo naznačeno v úvodu, většina závad technických zařízení má za následek zvýšení vibrací. Právě proto jsou vibrační signály jedním z nejvhodnějších indikátorů technického stavu diagnostikovaného objektu. [5, 6]

Norma ČSN ISO 2041: Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník definuje vibrace jako „mechanické kmitání kolem rovnovážné polohy; kmitání může být periodické nebo náhodné“. Kmitání poté tato norma definuje jako „kolísání velikosti veličiny, obvykle v čase, vzhledem ke stanovené referenci, je-li velikost veličiny střídavě větší a menší než stanovená reference“. [7]

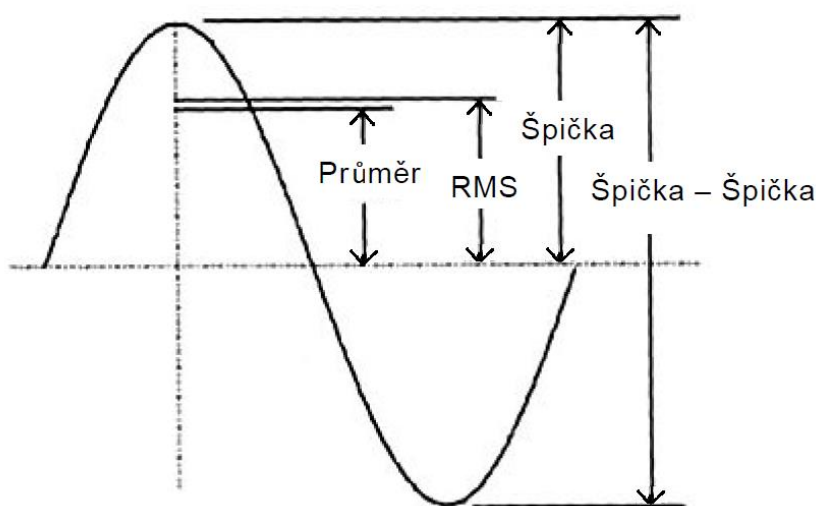
Důležité je si uvědomit, že vibrace jsou v případě vibrační diagnostiky nosičem informací o technickém stavu strojního zařízení, nikoli problémem samotným (jak se často mylně uvažuje v praxi). Zvýšené vibrace signalizují, že na stroji se vyskytuje určitá závada. Různé typy závad generují vibrace svým specifickým způsobem (jak je rozebráno později). Pro správné určení závady je však velmi důležité použít vhodnou metodu analýzy vibračních signálů. [5, 6, 8]

3.4 Vibrační diagnostika

Vibrační diagnostika je bezdemontážní diagnostika prováděná na strojním zařízení během jeho provozu. Je založena na vyhodnocování mechanického kmitání (tj. vibrací), měřeného na pohyblivých i nepohyblivých částech stroje. Využití nachází při běžném provozním monitorování i při diagnostických kontrolách. [9, 10]

Je nejvíce používanou metodou pro monitorování technického stavu rotačních strojů, protože dokáže (za předpokladu, že je správně a kvalifikovaně provedena) identifikovat poruchu, určit původ poruchy a s předstihem upozornit na vznik dalších problémů. [9, 10]

Jak již bylo řečeno, nosičem informací jsou v případě vibrační diagnostiky vibrace. Jejich mohutnost lze charakterizovat jejich amplitudou (což je maximální hodnota výchylky). Amplitudu lze vyjádřit špičkovou hodnotou (peak), hodnotou špička-špička (rozkmit, peak to peak), průměrnou hodnotou (average) či efektivní hodnotou (RMS – root mean square). Způsoby vyjádření amplitudy jsou ilustrovány obr. 1. [2, 9, 11]



Obr. 1 – Způsoby vyjádření amplitudy sinusového signálu [11]

Dalšími důležitými parametry jsou parametry charakterizující zdroj buzení. Takovými parametry jsou frekvence (běžně uváděná v jednotkách Hz) a perioda (doba trvání jednoho kmitu, uváděná v s), přičemž frekvence je převrácená hodnota periody. [1, 2, 9]

Mezi hlavní důvody toho, že vibrodiagnostika je nejrozšířenější metoda technické diagnostiky, patří: [1]

- možnost měření za plného provozu stroje (bez případných úprav stroje),
- univerzálnost metody (lze jí identifikovat širokou škálu poruch),
- lokalizační účinek (dá se pomocí ní dobře určit místo poruchy),
- preventivnost (porucha je indikována s dostatečným předstihem),
- možnost jejího použití jako hlavní i jako vedlejší diagnostická metoda,
- vysoký informační obsah – vibrace určují:
 - životnost a spolehlivost strojního zařízení,
 - hlučnost,
 - jakost produkce (např. přesnost obrábění),

- dynamické zatížení konstrukce,
- přenos vibrací na lidské tělo,
- široká nabídka vybavení (snímačů, software),
- jednoduchost detekce signálu (jednoduché uchycení snímačů, jejich malé rozměry),
- velké množství propracovaných metodik,
- a další (možnost zapojení do systému trvalého sledování, snadná identifikace nesouososti a nevyváženosti atd.).

3.4.1 Budící síla

Charakter vibrací závisí na druhu působící síly (tzv. budící síle). Základními a nejběžnějšími typy budící síly jsou: [2, 4]

a) Periodická budící síla

Nejjednodušší případ periodické budící síly je síla harmonická. V praxi se s takovouto silou dá setkat jen velmi zřídka, ale na druhou stranu většina sil, které se vyskytují v oblasti rotačních strojů, se dá vyjádřit součtem harmonických sil. [2, 4]

Harmonickou sílu lze obecně vyjádřit rovnicí:

$$f(t) = F * \sin(\omega * t + \varphi_F), \quad (1)$$

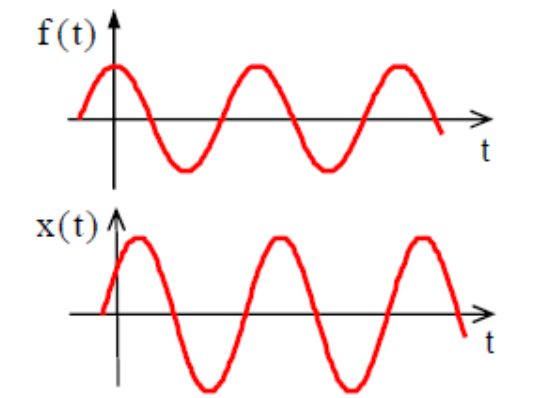
kde je F ... amplituda budící síly [N],
 ω ...kruhová frekvence budící síly [rad/s],
 t ...čas [s],
 φ_F ...počáteční fázový posuv budící síly.

V případě, že na těleso působí harmonická síla, je po ustálení pohyb tělesa také harmonický – kruhová frekvence je stejná, ale amplituda je obecně jiná. Jedná se o tzv. vynucené kmitání. Výchylka kmitání je popsána rovnicí: [2, 4]

$$x(t) = X * \sin(\omega * t + \varphi_F - \varphi), \quad (2)$$

kde je X ...amplituda vynuceného kmitání [μm],
 φ ...fázový posuv – zpoždění výchylky za budící silou [-].

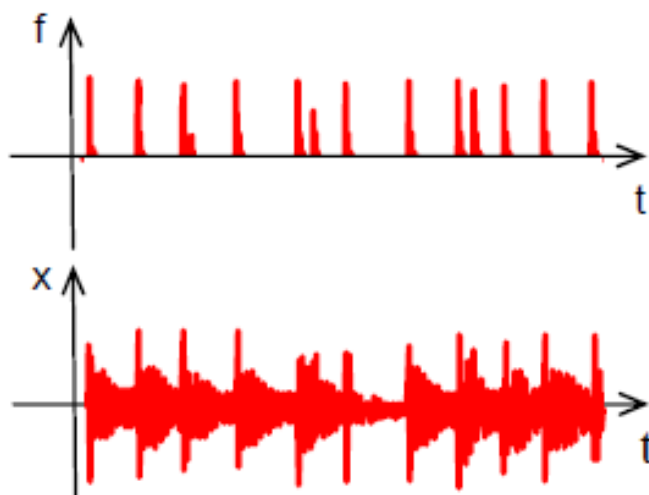
Budící síla i vibrační odezva jsou tedy u tohoto typu kmitání periodické. Na obr. 2 je zobrazen graf vynuceného kmitání za působení harmonické budící síly.



Obr. 2 - Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly [4]

b) Impulsní budící síla

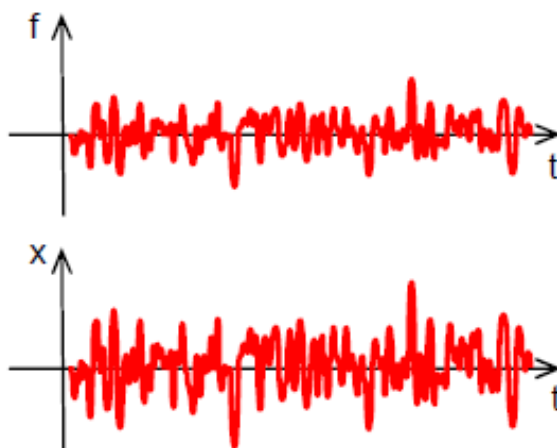
Pokud budící síla způsobí vychýlení tělesa z rovnovážné polohy a následné volné kmitání na jedné (či více) vlastních frekvencích, jedná se o budící sílu impulsní. Záměrného impulzního buzení se využívá např. při bump testu, což je metoda pro analýzu modálního chování zařízení, spočívající v úderu do měřeného objektu a měření amplitudy a frekvence výsledných vibrací testovaného objektu. Volné kmitání za působení impulsní budící síly je zobrazeno na obr. 3. Příkladem impulsní budící síly může být třeba poklepání na skleničku (prasklá sklenička vydá jiný zvuk než nepoškozená) či rozeznění zvonu. [2, 4, 12]



Obr. 3 - Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou [4]

c) Budící síla náhodného průběhu

Pokud na těleso působí budící síla náhodného průběhu, je rovněž náhodná i odezva na ni. Mohou však být vybuzeny i vlastní frekvence, stejně jako u impulzního typu budící síly. Tento typ budící síly je přítomen vždy, i když většinou pouze jako šum. Kmitání způsobené budící silou náhodného průběhu je zobrazeno na obr. 4. [4]



Obrázek 4 - Kmitání buzené silou náhodného průběhu [4]

3.4.2 Měřené veličiny

Veličiny, které jsou měřeny během vibrační diagnostiky, korespondují s veličinami, kterými se v mechanice popisuje pohyb. Jedná se tedy o: [2, 4, 13]

a) Výchylku (respektive dráhu) vibrací

Tato veličina udává konkrétní výchylku daného bodu v daném čase. Udává se v mikrometrech [μm]. Pro popis měření při frekvencích vyšších než 10 Hz není moc vhodná, proto se tato veličina většinou nepoužívá. Popsat ji lze pomocí vztahu:

$$x(t) = X * \sin(\omega * t). \quad (3)$$

b) Rychlost vibrací

Tato veličina udává rychlost vibrací v daném čase. Je první derivací výchylky podle času. Udává se v milimetrech za sekundu [mm/s]. Využívá se pro měření v rozsahu frekvencí zhruba 10 Hz až 1 kHz. Popsat ji lze pomocí vztahu:

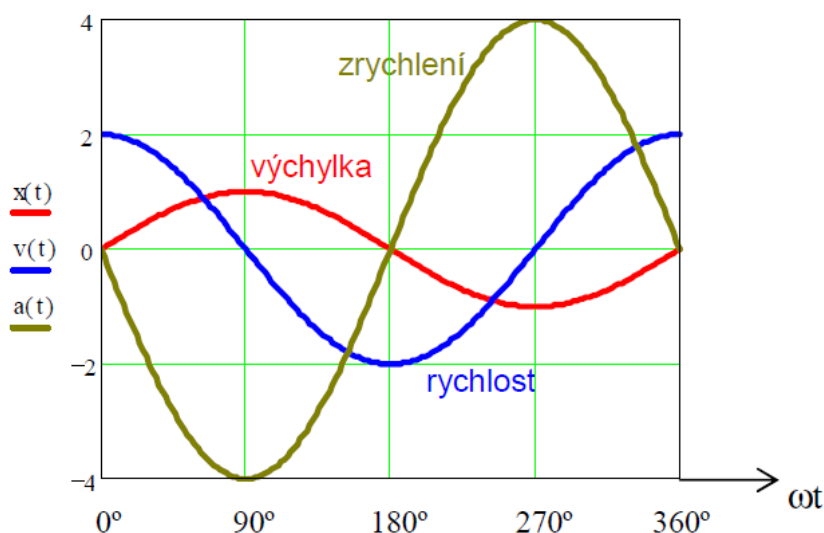
$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X * \omega * \cos(\omega * t). \quad (4)$$

c) Zrychlení vibrací

Tato veličina udává zrychlení vibrací v daném čase. Je první derivací rychlosti podle času. Udává se v násobcích zemského gravitačního zrychlení ($9,81 \text{ m/s}^2$) [g], případně v [m/s^2]. Obvykle se využívá při popisu měření s frekvenčním rozsahem větším než 1 kHz. Popsat jej lze pomocí vztahu:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X * \omega^2 * \sin(\omega * t). \quad (5)$$

Je zřejmé, že tyto 3 veličiny jsou na sebe navzájem navázány. Proto při znalosti velikosti jedné z nich se dá jednoduše zjistit velikost zbývajících dvou. To názorně ilustruje obr. 5 (uvažujeme $X = 1 \text{ mm}$, $\omega = 2 \text{ rad/s}$). [2, 9]



Obr. 5 - Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací [4]

Při volbě veličiny, která bude pro měření použita, je vhodné zvolit tu, která dává přijatelný odstup mezi signálem a šumem (který je vždy přítomný). Díky tomu se minimalizuje

nepřesnost měření. Pomocí ve výběru může např. frekvenční rozsah měření (u měření s velkým frekvenčním rozsahem bude použito zrychlení vibrací, u měření s menším frekvenčním rozsahem, například jen na otáčkové frekvenci, bude lepší použít rychlost vibrací. [4]

3.4.3 Snímače pro měření vibrací

Umístění snímačů

Samotné měření vibrací je prováděno na místech uložení ložisek. Pokud to není možné (například z důvodu špatné přístupnosti na dané místo), měření je provedeno co možná nejbližší k místu předpokládaného zdroje vibrací. [9]

Norma ČSN ISO 20816-1 Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny doporučuje v tomto případě měření provést na nosných ložiskových skříních, případně jiném místě, které charakterizuje celkové vibrace strojního zařízení a reaguje s dostatečnou významností na dynamické síly, které jsou přenášeny z rotujících elementů. [13]

Měření probíhá zpravidla ve 3 na sebe vzájemně kolmých směrech. Obvykle se dvě měření provedou v radiálních směrech a jedno ve směru axiálním. [13]

Typy snímačů vibrací

Snímače vibrací se dělí (dle měřených veličin viz kapitola 3.4.2) na 3 základní typy: [2]

- a) snímače výchylky,
- b) snímače rychlosti (velometry),
- c) snímače zrychlení (akcelerometry).

Každý snímač je charakterizován svým dynamickým rozsahem, což je rozsah amplitud měřené veličiny, který je možné uvažovaným snímačem měřit. Při volbě snímače je potřeba uvažovat navíc ještě i konkrétní aplikaci. [4]

Kromě těchto základních typů snímačů jsou používány i další, jako např.: [8]

- proudové ampérmetry, převodníky napětí (měří elektrické parametry),
- dynamické snímače tlaku (měří tlakové pulzace),
- tenzometry (měří deformaci, kroutící moment),
- apod.

a) Snímače výchylky

Nejčastěji využívaným typem snímače výchylky je snímač fungující na bázi vířivých proudů. Principem takového snímače je to, že při změně vzdálenosti (výchylky) se změní odpor prostředí, a z toho důvodu i vířivé (Foucaultovy) proudy. Tento typ snímače je dodáván ke konkrétnímu materiálu, ze kterého je měřený povrch tvořen, pro jiný materiál je nelze použít. Navíc je tento typ citlivý i na další parazitické vlivy, jako např. délka kabelu (případně jeho poškození či stínění) či vnější elektromagnetické pole. Tyto aspekty značně zužují možnosti jejich využití. [4, 14]

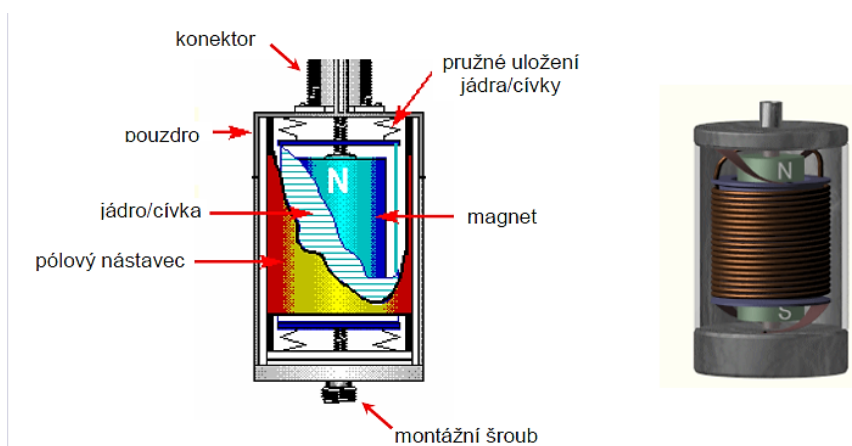
Tento snímač měří vzdálenost mezi povrchem a svou špičkou. Obvykle se nepoužívají 3 vzájemně kolmé snímače (jako u ostatních typů snímačů), ale jen dva, které jsou od sebe odkloněny o 90°. [4]

b) Snímače rychlosti (velometry)

Tento typ snímačů pracuje nejčastěji na principu elektromagnetické indukce. Na cívce, pohybující se v magnetickém poli, se indukuje napětí. Velikost tohoto napětí je přímo úměrné rychlosti vibrací měřeného stroje. To je zajištěno konstrukcí snímače, proto mají snímače určené pro měření ve vertikálním směru jinou konstrukci než snímače pro měření ve směru horizontálním. Konstrukce snímače rychlosti je znázorněna na obr. 6. [4]

Rezonanční frekvence snímače je obvykle pod 10 Hz, dá se však tlumit např. naplněním pouzdra snímače olejem (poté se s nimi dá měřit dokonce od 1 Hz). Frekvenční rozsah snímače se pohybuje mezi 10 Hz až 1000 Hz (za spodní hranici se bere s jistou chybou rezonanční frekvence). [4, 14]

Výhodou těchto typů snímačů je jejich cena a citlivost, nevýhodou je však jejich křehkost. Jsou náchylné na otřesy (a na vibrace v jiných směrech, než ve kterých mají měřit). Proto je není vhodné využívat k ručnímu měření. [4]



Obr. 6 – Snímač rychlosti [4]

c) Snímače zrychlení (akcelerometry)

Akcelerometr je v současnosti nejpoužívanější typ snímače vibrací. Principem jeho fungování je piezoelektrický jev. [2]

Destička (složená z piezoelektrického keramického materiálu) je uložena mezi dvěma hmotami – první (referenční seismickou setrvačnou hmotou, která zůstává v klidu i při kmitání strojního zařízení, které je objektem diagnostiky) a druhou (pevně spojenou s obalem snímače – a tedy i se strojním zařízením, proto tato hmota zároveň se strojním zařízením kmitá). V případě vibrací zařízení začnou hmoty destičku deformovat a tím na ní vzniká elektrický náboj, jehož velikost je této deformaci (a tím pádem i zrychlení vibrací) přímo úměrná. [4]

Každý akcelerometr má svou vlastní dolní frekvenční mez, jejíž hodnota závisí na několika faktorech (např. na tuhosti uložení, materiálu snímače, hmotnosti snímače). Pokud je frekvence kmitání pod hodnotou dolní frekvenční meze, neprobíhá generování elektrického náboje na piezoelektrickém materiálu a tím pádem nelze tímto snímačem měřit. Obecně mají větší snímače lepší hodnoty citlivosti (u starších typů udávaná v pC/ms^{-2} či pC/g , u novějších typů v mV/g) a mohou měřit nižší frekvence. [4]

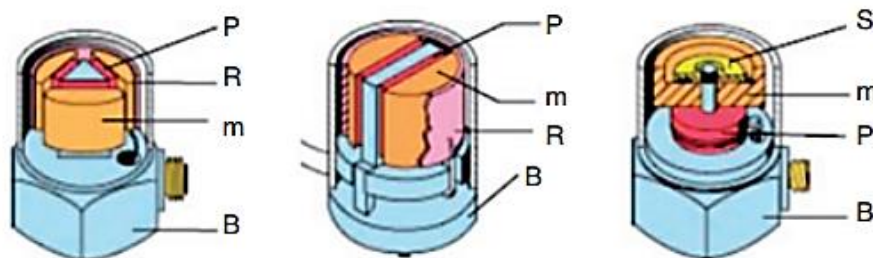
Výhodou akcelerometrů je spolehlivost a trvanlivost, široký frekvenční rozsah (od 0,1 Hz do 40 kHz) i dynamický rozsah, snadná instalace a možnost připevnit je na stroj

v jakékoli poloze. Nevýhodou je, že nemohou měřit již od 0 Hz a že je potřeba dbát, aby piezoelektrický prvek nebyl deformován jinak než od vibrací (a tím pádem nedodával chybné informace). [4]

Akcelerometry se dle konstrukčního uspořádání dělí na: [14]

- **Delta Shear®** – Při tomto konstrukčním uspořádání akcelerometr obsahuje tři dvojice piezoelektrických krystalů a setrvačných hmot upevněných do trojúhelníku na středovém sloupku. Toto uspořádání zaručuje dobrou citlivost, malou hmotnost a použitelnost při vyšších teplotách.
- **Planar Shear** – Podobné uspořádání jako předchozí, ale obsahuje jen dvě dvojice (což má za následek nižší citlivost).
- **Akcelerometr s centrálním tlakovým namáháním** – piezokrystal i setrvačná hmota snímače jsou namontovány na středový nosník. Tento typ má nejmenší citlivost a největší hmotnost setrvačné hmoty.

Všechny 3 základní konstrukční typy uspořádání piezoelektrických akcelerometrů jsou zobrazeny na obr. 7. Vlevo je zobrazeno konstrukční uspořádání Delta Shear®, uprostřed je zobrazeno konstrukční uspořádání Planar Shear, vpravo akcelerometr s centrálním tlakovým namáháním.



Obr. 7 – Základní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů [14]

Legenda k obrázku:

P – piezoelektrický prvek,

B – těleso snímače,

m – setrvačná hmota,

R – předpínací prstenec (ve třetím případě S - předpínací disk).

Upevnění snímačů vibrací

Důležitou částí vibrační diagnostiky je upevnění snímače na měřený stroj. Správným upevněním snímače se snažíme docílit toho, aby to, co snímač měří (čili to, co se děje se snímačem samotným) bylo zároveň i to, co se skutečně děje se strojem. Nevhodné upevnění by mohlo naměřená data naprosto znehodnotit, nebo minimálně výrazným způsobem omezit frekvenční rozsah daného snímače. [4]

Měřený povrch i povrch snímače musí být očištěny (nesmí obsahovat kovové ořepky a další nečistoty bránící kontaktu), musí být hladké a rovné. Snímač lze lehce podmazat

silikonovým tukem, což má za následek vyplnění mikroskopických dutin povrchu a tím pádem zlepšení kontaktu mezi snímačem a povrchem. [4, 15]

Upevnění snímačů na měřený objekt lze provést několika způsoby. Mezi nejpoužívanější způsoby patří uchycení šroubem, upevnění pomocí magnetu, přilepení oboustrannou lepicí páskou, včelí vosk, přiložení dotykové sondy nebo použití lepidla. [4, 15]

- a) **Uchycení šroubem.** Tento typ uchycení poskytuje spoustu výhod, patří mezi ně například pouze malé ovlivnění frekvenčního rozsahu senzoru či spolehlivost uchycení. Musí nicméně být dbáno na čistotu a rovnost plochy pod snímačem, snímač musí dosednout celou plochou. Závitový otvor pro šroub musí být kolmý k povrchu, který bude měřen. Navíc musí být dodrženy přísné požadavky na kvalitu tohoto otvoru – což je v praxi velmi obtížné. Samozřejmě musí být použit správný typ závitu (u těchto snímačů se často jedná o jiný typ než metrický). Dalším problémem je, že vrtání otvoru do objektu kvůli měření je často nežádoucí. Šroub je u některých typů snímače jeho součástí, u jiných typů má snímač závitový otvor. [4, 15]
- b) **Upevnění pomocí magnetu.** Tento způsob uchycení poskytuje možnost rychlé montáže/demontáže snímače (což může být vhodné při měření velkého množství měřicích bodů). Měřený povrch (čili dosedací plocha) musí být hladký, rovný a feromagnetický, dále bez okují a barvy. Pokud povrch nesplňuje tyto požadavky, někdy se využívá kovová podložka (přilepená či přivařená na povrch). Použitelný frekvenční rozsah je zhruba do 2 kHz. [4, 15]
- c) **Přilepení oboustrannou lepicí páskou.** Jedná se o rychlý a jednoduchý způsob uchycení, ale z důvodu nízké spolehlivosti ne příliš používaný. [15]
- d) **Včelí vosk.** V diagnostice nyní již nepoužívaný způsob přichycení snímače. Tenká vrstva vosku je nanášena mezi zkušební povrch a základnu snímače, následně se snímač přitlačí (za současného kroutícího pohybu). Tento způsob uchycení stále nachází občasné využití v laboratorních podmínkách (u menších snímačů). Výhodou je rychlá montáž a demontáž. Mírně zužuje frekvenční rozsah snímače a jeho využití je (kvůli měknutí včelího vosku při vyšších teplotách) omezeno jen na teploty menší než cca 40 °C. [4, 15]
- e) **Dotyková sonda.** Využívaná jen pro orientační měření do cca 1 kHz. V diagnostické praxi tento způsob uchycení není používán z důvodu velkého zkreslení výsledků měření. [4]
- f) **Použití lepidla.** Aby byl zachován frekvenční rozsah snímače, musí být plocha upravena (jak je uvedeno výše) a navíc musí být použito vhodné lepidlo, které netlumí účinky vibrací (např. HBM X60). Obvykle se na stroj nelepi samotný snímač, ale kovová podložka se závitem, na kterou se snímač přišroubuje (v tomto případě je navíc předcházeno nebezpečí znečištění snímače lepidlem). Při tomto typu uchycení je třeba dbát na maximální provozní teplotu (při jejím překročení by došlo ke změknutí lepidla) – tato teplota se pohybuje obvykle kolem 80 až 100 °C (u vysokoteplotních lepidel až 200 °C). Při demontáži je třeba dbát na opatrnost, aby nedošlo k mechanickému poškození snímače či podložky. [4, 15]

Při řešení této diplomové práce byla zvolena možnost uchycování snímačů lepením. K tomuto účelu bylo použito dvousložkové lepidlo HBM X60 na tenzometry.

Dvousložkové lepidlo HBM X60

Složka A lepidla je prášková a složka B je tekutá. Lepidlo je jednoduché a snadno užitelné. Je schopno spojit všechny běžně používané kovy ve strojírenství, nekovové materiály (sklo, porcelán, beton) i plasty. [16]

Toto lepidlo lze využít pro měření v teplotních rozmezích $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. [16]

Při správném skladování (pokojová teplota, zavřená nádoba, ochrana před přímým dopadem slunečního záření) by měla být trvanlivost lepidla nejméně 1 rok. [16]

Postup lepení

1. Před lepením je nejprve potřeba měřený povrch očistit od rzi, barvy a dalších nečistot. Dále je potřeba zarovnat důlky, škrábance, vyvýšeniny a další nepravidelnosti povrchu (například pomocí broušení, pilování). [16]
2. Následně povrch musí být odmaštěn (pomocí čistícího prostředku – např. RMS1, což je směs acetonu a isopropanolu). Důležité je, aby odmašťovací prostředek byl chemicky čistý. Proto je potřeba nebrat jej přímo ze skladovacího kontejneru, ale nalít menší množství do čisté nádoby a v tomto poté namočit hadřík z netkané textilie. Po použití nesmí být prostředek nalit zpět do kontejneru, došlo by totiž ke kontaminaci. [16]
3. V dalším kroku je třeba povrch zdrsňit (drsňější povrch je pro zakotvení lepidla ideální). Toho lze dosáhnout např. pomocí leptání či pískování. [16]
4. Po zdrsnění povrchu je třeba ihned povrch očistit od prachu a špíny (v žádném případě se to ale nesmí dělat foukáním na povrch či pomocí prstů, to by čistící proces znehodnotilo). Toto očištění lze provést např. pomocí drátěného kartáče nebo stlačeného vzduchu. [16]
5. Následně je třeba připravit lepidlo. Je potřeba připravit správnou kvantitu složek lepidla (dle manuálu jedna odměřovací lžice z balení plná komponenty A vystačí asi na 30 mm tenzometr, při přidání 6 až 7 kapek komponenty B). Začátek tvrdnutí nastane po několika minutách od smíchání komponent, při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je to asi 30 minut, při $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ale jen 1 minuta. Proto je třeba namixovat dostatečné množství lepidla pro jeden snímač a směs ihned použít. Jakmile jsou složky spojeny, začne probíhat chemická reakce vedoucí k ztvrdnutí lepidla a změkčení již není možné (proto je zároveň důležité dát pozor, aby se složky omylem nesmísily). [16]
6. Při aplikaci lepidla je doporučeno nanést asi 0,5 mm silnou vrstvu. Po přiložení snímače krouživým pohybem vytlačíme zespodu přebytečné lepidlo (aby výsledná vrstva lepidla byla co nejtenčí). Po 1 minutě kroužení (za pokojové teploty) by již lepidlo mělo být dostatečně navázané na senzor. Při teplotách kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je ale doporučováno přitlačovat dalších 20 až 30 minut senzor přitlačnou silou asi $10 - 20\text{ N/cm}^2$. [16]
7. Následně se lepidlo nechá zaschnout. Při vyšší teplotě probíhá tuhnutí rychleji (při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tuhnutí trvá cca 20 minut, při teplotách kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je to už cca 60 minut), proto lze tuhnutí urychlit opatrným zahříváním. [16]
8. Lepidlo lze zakrýt např. vatou (a tu zakrýt polyetylenovou folií), aby se snížilo vypařování směsi. [16]

Odejmutí nalepené součásti

Pokud nelze snímač mechanicky odejmout, lze jej oddělit např. pomocí metyletylketonu, acetonu apod. Někdy lze odejmutí provést až po delší době, protože rozpouštědlo penetruje do lepidla pomalu. [16]

3.4.4 Měření a vyhodnocování vibrací strojů

Před aplikací diagnostiky musí být nejdříve zvoleno pásmo frekvencí, ve kterém bude diagnostika probíhat. Zvolené pásmo měření vibrací musí být dostatečně široké na to, aby bylo pokryto frekvenční spektrum diagnostikovaného strojního zařízení. Jeho šířka se tedy nedá určit obecně, frekvenční rozsah závisí na typu uvažovaného stroje. [13]

Navíc norma ČSN ISO 20816-1 Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny upozorňuje na to, že kritéria hodnocení platí pouze pro vibrace, které vytváří strojní zařízení samotné (a ne pro vibrace přenášené na stroj z vnějších vlivů). [13]

Pro samotné hodnocení mohutnosti vibrací tato norma specifikuje dvě kritéria: [13]

- Kritérium I: Velikost vibrací při jmenovitých otáčkách a ustálených provozních podmínkách.
- Kritérium II: Změna velikosti vibrací.

Kritérium I: Velikost vibrací

Pro potřeby tohoto kritéria se používá tzv. mohutnost vibrací. Tu norma definuje jako maximální širokopásmovou hodnotu velikosti vibrací (tedy nejvyšší naměřenou hodnotu na různých místech stroje). Mohutnost vibrací pak charakterizuje vibrační stav tohoto stroje. [4, 13]

Dle mohutnosti vibrací je pak stroj zařazen do jednoho ze 4 pásem: [13]

- **Pásmo A** – Do tohoto pásma spadají obvykle jen vibrace nově přejímaných strojů. Snaha o dosažení vibrací v pásmu A je většinou nepřiměřeně náročná a zbytečná.
- **Pásmo B** – Pokud spadají vibrace strojního zařízení do tohoto pásma, znamená to, že zařízení může být provozována po neomezeně dlouhou dobu.
- **Pásmo C** – Pokud spadají vibrace strojního zařízení do tohoto pásma, je zařízení obvykle nevyhovující k dlouhodobému trvalému provozu. Stroje v tomto stavu mohou být provozovány, dokud nenadejde příležitost pro nápravu.
- **Pásmo D** – Do tohoto pásma spadají takové hodnoty vibrací, které jsou považovány obvykle za tak závažné, že by mohlo dojít k poškození strojního zařízení.

Díky zařazení daného strojního zařízení do jednoho z pásem mohou být navržena potřebná opatření (provoz do další plánované údržby, okamžité odstavení atd.). Hranice pásem byly stanoveny na základě mezinárodních zkušeností. Přesné hodnoty na hranicích pásem je však v praxi často nutné určit pro každý specifický typ stroje (v takovém případě je nutné vysvětlit důvody zvýšení/snížení hodnot hranic pásma a potvrdit, že strojní zařízení nebude ohroženo z důsledku přílišných vibrací). [13]

Norma udává hodnoty rychlosti vibrací v mm/s pro hranice pásem takto: [13]

- Hranice pásma A/B – 0,71 až 4,5 mm/s,
- Hranice pásma B/C – 1,8 až 9,3 mm/s,
- Hranice pásma C/D – 4,5 až 14,7 mm/s.

Hodnoty na dolním konci rozsahu platí obvykle pro malé stroje (např. elektromotory s výkonem do 15 kW), zatímco velké stroje mají tendenci být na horním konci rozsahu. [13]

Kritérium II: Změna velikosti vibrací

Nevýhoda hodnocení dle druhého kritéria je to, že musejí existovat hodnoty naměřené z dřívějška. Je tedy vyžadováno dlouhodobější sledování daného strojního zařízení. Výhodou je, že může odhalit významné zvětšení či zmenšení vibrací, na které by bylo vhodné nějak zareagovat, přestože hodnoty vibrací se nevyskytují v pásmu C či D dle prvního kritéria. Tyto změny vibrací mohou být postupné, nebo i okamžité. [13]

Při aplikaci kritéria II musí být jednotlivé porovnávané hodnoty vibrací sejmuty snímačem ve stejném místě a za co možná nejpodobnějších provozních podmínek. [13]

Vývoj sledované veličiny v průběhu času se nazývá trendem hodnot sledované veličiny. [4]

U některých typů strojů se pro dlouhodobé sledování vibračního chování stanoví tzv. provozní meze vibrací. Konkrétně se jedná o 2 meze: VÝSTRAHU (ALARM) a PŘERUŠENÍ PROVOZU (TRIP). Hodnoty těchto mezí jsou obvykle nastaveny na základě zkušeností s obdobnými typy strojů, či dle dohodnutých hodnot pro přejímku. [13]

- VÝSTRAHA – Hodnota této meze je nižší než hodnota meze PŘERUŠENÍ PROVOZU. Pokud hodnoty vibrací dosáhnou této meze, provoz může obvykle pokračovat, nicméně mělo by být provedeno přezkoumání zjištění příčiny, případně by měla být provedena nápravná akce. [13]
- PŘERUŠENÍ PROVOZU – Při překročení této meze by pravděpodobně další provoz stroje mohl mít za následek jeho poškození. Proto by měla být okamžitě vykonána akce pro snížení vibrací, případně by měl stroj být odstaven z provozu. [13]

3.4.5 Typy měření vibrací

Norma ČSN ISO 20816-1 dělí měření vibrací na 3 typy (respektive 2 typy, přičemž druhý se ještě dále dělí): [13]

1. Měření vibrací na nerotujících částech,
2. Měření vibrací na rotujících částech,
 - Měření relativních hřídelových vibrací,
 - Měření absolutních hřídelových vibrací.

Měření vibrací na nerotujících částech

Toto měření je prováděno na nerotujících částech. K měření se používá seismický snímač (což je velometr či akcelerometr), který snímá absolutní rychlost či zrychlení konstrukční části, na které je upevněn (příkladem může být ložisková skříň). [13]

Měření relativních hřídelových vibrací

V případě tohoto typu měření snímá snímač vibrací vibrace mezi statorovou částí, na které je upevněn a která sama vibruje (opět to může být například ložisková skříň), a rotujícím hřídelem. [4, 13]

Měření absolutních hřídelových vibrací

Absolutní vibrace jsou vibrace rotoru vztažené k nehybné soustavě (např. k zemi) (zatímco relativní vibrace jsou vztaženy k uměle vytvořené základně). [14]

Měření absolutních vibrací je zpravidla znatelně náročnější než měření vibrací relativních.

Pro jejich měření jsou využívány dvě metody: [13]

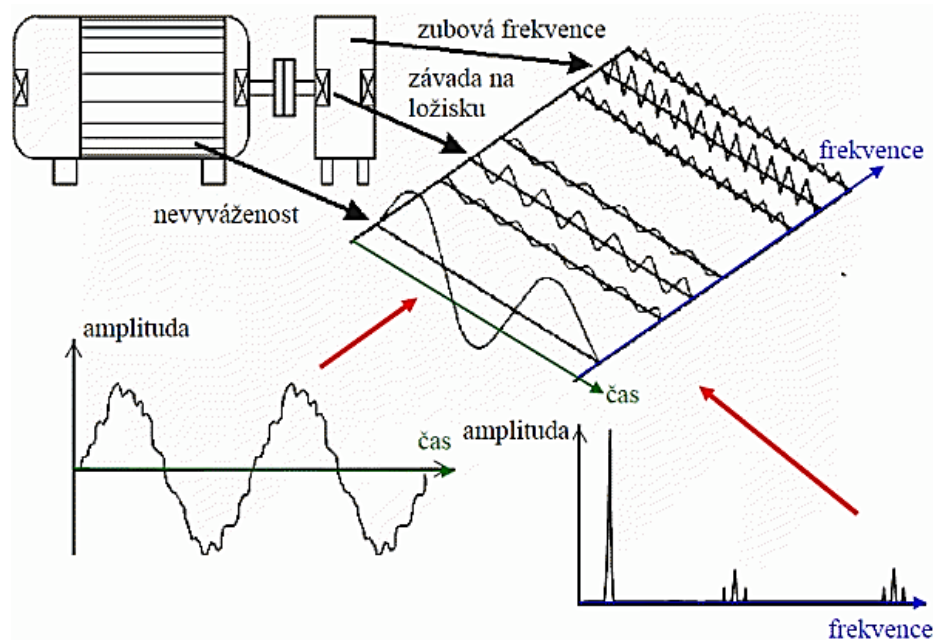
- **Kluzátkem.** Kluzátko je tyč, která se dotýká rotující hřídele a na kterou je upevněn seismický snímač. Absolutní vibrace jsou tak měřeny přímo.
- **Bezdotykovým snímačem a seismickým snímačem.** Zatímco bezdotykový snímač měří relativní hřídelové vibrace, tak seismický snímač měří, jaké vibrace má podpora. Důležité je, aby oba dva snímače byly umístěny v dostatečné blízkosti, aby jejich pohyb ve směru měření byl stejný. Pro zjištění absolutních vibrací jsou výstupy z obou dvou snímačů sečteny.

3.5 Metody analýzy vibrací

Problémem ve vibrační diagnostice je to, že i když nastane případ, kdy celková hodnota vibrací odpovídá mezím, které byly specifikovány, nemusí to ještě znamenat, že je strojní zařízení v naprostém pořádku. Proto kromě již zmíněných metod analýzy vibrací (Analýza celkových hodnot vibrací a Trendování celkových hodnot vibrací) jsou využívány i různé další metody. [4, 6]

3.5.1 Spektrální analýza signálu vibrací pomocí FFT

Tato metoda analýzy vibrací je používána proto, že každá časová vlna je složena z více částí. Tyto jednotlivé části většinou odpovídají příspěvkům od různých vibrujících součástí strojního zařízení. Toto je demonstrováno na obr. 8. A právě frekvenční analýza slouží k rozpoznání jednotlivých frekvenčních složek ve vibračním spektru. [4]



Obr. 8 – Příspěvky od jednotlivých vibrujících částí zařízení a jejich zobrazení v časové vlně a frekvenčním spektru [17]

Princip metody spočívá v rozkladu časového záznamu vibrací pomocí FFT (rychlé Fourierovy transformace, Fast Fourier Transformation) na soubor harmonických funkcí. Ty se ve většině případů navzájem odlišují frekvencí, amplitudou i počáteční fází. Graf, do kterého je tato množina harmonických funkcí zanesena jako závislost amplitudy zkoumané veličiny na frekvenci, se nazývá frekvenčním spektrem. [8]

Zjednodušeně lze tedy říci, že Fourierova transformace ve vibrodiagnostice slouží k převedení informace o vibracích z časové oblasti (kde není možné rozlišit, co je způsobeno kterým jevem) do oblasti frekvencí (ve které je každý samostatný jev vyjádřen svou vlastní sinusovkou odpovídající frekvence). Tím pádem je možné zkoumat odděleně všechny původní signály. [4, 5]

Aby Fourierova transformace nevedla k chybným výsledkům, musí se dát pozor na dvě základní chyby: chybu vzorkováním a chybu únikem. [2]

Chyba vzorkováním

Chyba vzorkováním je někdy také nazývána jako chyba typu aliasing nebo obecně stroboskopický efekt. Tato chyba nastává, když vzorkovací frekvence f_s je příliš malá, aby byl pomocí ní reálně zachycen rychlý děj. V praxi je tato chyba vidět např. ve filmech, kde se kola automobilu či kočáru zdánlivě točí příliš pomalu či dokonce opačně ke směru jízdy. [2, 4]

Řešením této chyby je využívání anti-aliasingového filtru. Ten ze spektra odstraní složky s příliš vysokou frekvencí oproti vzorkovací frekvenci (v praxi to znamená odstranění složek s vyšší frekvencí než je $f_s/2$). [4]

Chyba únikem

Chyba únikem (neboli chyba typu leakage) je způsobena tím, že pro využití Fourierovy transformace je předpokládáno, že vibrační signál je periodickou funkcí. To ale ve skutečnosti není vždy pravda. Tím pádem dochází ke zkreslení spektra signálu (neboli k úniku). [4]

K potlačení této chyby se využívají tzv. váhová okna. Pomocí oken se na signál nahlíží jakoby přes okno vhodného tvaru. Nejčastěji využívané je Hanningovo okno. To na začátku a konci potlačí signál k nule, čímž se odstraní nespojitosti a signál se více přiblíží k periodickému. [2]

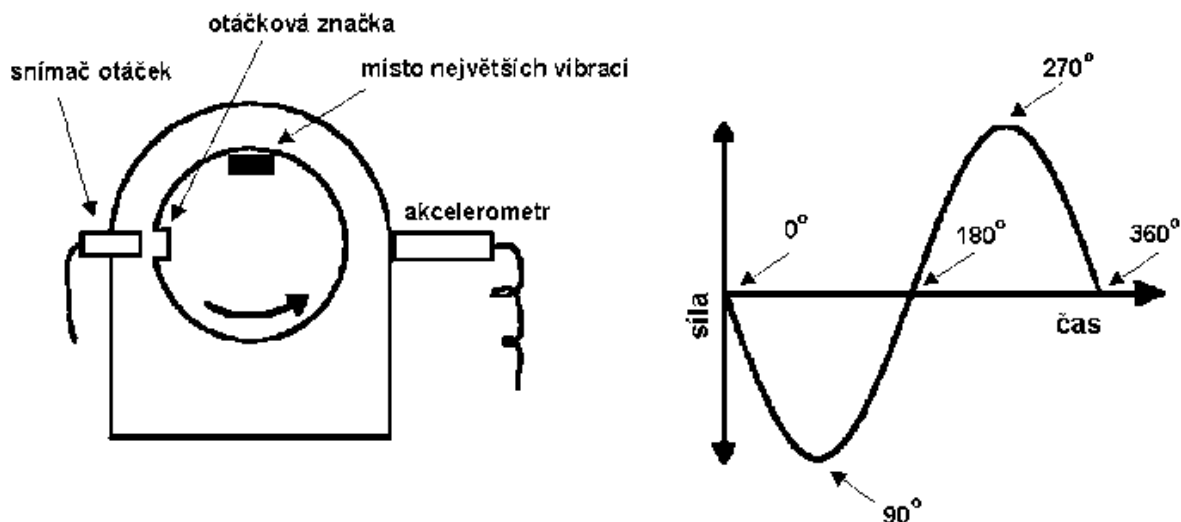
Dalším typem okna je obdélníkové okno. Použití tohoto okna znamená, že vlastně není použito žádné váhové okno a že do transformace vstupuje celý signál. Použití tohoto okna je doporučeno pouze, pokud je vstupní signál periodický. [4]

3.5.2 Měření a analýza fáze

Pomocí této metody lze lokalizovat problémy a posoudit vzájemný pohyb různých bodů na hřídeli (např. referenčního bodu a bodu, ve kterém je detekován problém). [4]

Měření fáze je určování úhlového posunu mezi signálem od referenční značky a vibračním signálem hřídele. Fázový posun tedy dává informaci o tom, za jakou část cyklu od zahájení měření dosáhnou hodnoty vibrací svého maxima. [6]

Obr. 9 zobrazuje případ, kdy fázový posun (fáze) je 270° . [5]



Obr. 9 – Měření fáze ve vibrodiagnostice [5]

Umístění referenční značky (referenčního bodu, otáčkové značky) je libovolné, ale v praxi je nejvýhodnější použít místo, které obsahuje diskontinuitu jako drážku pro pero na hřídeli, díky čemuž je signál zřetelný. [6]

3.5.3 Metoda obálky zrychlení

Tato metoda slouží ke spolehlivému odhalení vznikajících problémů na strojním zařízení. Pomocí ní se extrahuje a zvýrazní impulsní charakter analyzovaného signálu. [6, 18]

V prvním kroku se pomocí pásmového filtrování oddělí nízkofrekvenční signály vad. Dolní mez filtru je obvykle nastavena tak, aby bylo potlačeno alespoň prvních deset harmonických násobků otáčkové frekvence. Horní mez může být nastavena přibližně na dvousténásobek otáčkové frekvence (cílem je potlačení složek signálu s vysokými frekvencemi, které mohou být uměle zesíleny např. rezonancí snímače). [8]

Ve druhém kroku je zbylá část signálu usměrněna. Cílem usměrnění je zesílení části signálu, která odpovídá odezvě na vznikající problémy v ložisku. Výstupem jsou tedy kladné a zesílené hodnoty vibrací. [4, 8]

Signál je poté dále zpracován. Celková hodnota obálky zrychlení se udává v jednotkách gE (protože se jedná o zrychlení obálkového signálu a ne o zrychlení vibrací). Zrychlení vibrací g a zrychlení obálkového signálu gE nelze zaměňovat. Ze signálu získaného obálkovou analýzou je poté pomocí FTT vytvořeno spektrum obálky zrychlení. [4]

Meze obálkových filtrů u zařízení firmy SKF jsou: [4, 5, 6]

- | | | |
|--------------|-----------------|---|
| • Obálka I | 5 Hz – 100 Hz | pro velmi pomaloběžná strojní zařízení, |
| • Obálka II | 50 Hz – 1 kHz | pro pomaloběžná strojní zařízení, |
| • Obálka III | 500 Hz – 10 kHz | pro běžná strojní zařízení, |
| • Obálka IV | 5 kHz – 40 kHz | pro převodovky a vysokootáčkové stroje. |

3.5.4 Měření a analýza obálky akustické emise (AEE)

Metoda AEE (Acoustic Emission Enveloping) byla vyvinuta firmou SKF a je využívána pro detekci závad ložisek. Je následovníkem metody SEE (Spectral Emitted Energy), což je typ detekce závad ložisek rovněž vyvinutý firmou SKF. Je vhodné ji používat jako doplnění k dalším typičtějším vibračním metodám při naplňování koncepce multiparametrického monitorování stavu. [8]

Tato metoda využívá detekci akustických emisí (vznikajících při provozu rotačních částí strojních zařízení) ve frekvenčním rozsahu 100 kHz až 500 kHz. Akustická emise je generována tlakovou vlnou, která se vytváří při namáhání materiálu. Tato emise je detekována pomocí snímače AEE, který plní funkci mikrofону. Tento snímač signál AEE měří nejlépe při upevnění na upravenou (barva je odstraněna) a olejem opatřenou měřicí plochu pomocí šroubu. [8]

Díky zkušenostem s touto metodou byly vytvořeny meze celkových hodnot AEE, pomocí kterých lze vyhodnotit stav ložiska.

- AEE 0-3: Není indikována žádná závada,
- AEE 3–20: Závada mazání, znečištění, možné poškození ložiska,
- AEE 20-100: Poškození ložiska nebo silné znečištění,
- AEE >100: Vážné poškození ložiska.

Vzhledem k náročnosti metody nebyla pro účely této diplomové práce diagnostika metodou AEE provedena.

3.6 Nejběžnější závady odhalitelné vibrační diagnostikou

Při vibrační diagnostice může být odhalena celá řada závad strojů. Níže jsou popsány nejběžnější závady, kterými se v praxi vibrační diagnostika zabývá, a způsoby, jak lze tyto záhady odhalit.

3.6.1 Nejběžnější závady rotačních strojů

Mezi nejběžnější závady na rotačních strojních zařízeních patří nevyváženost, nesouosost, rezonance, mechanické uvolnění nebo přidírání rotoru. [4, 19]

Nevyváženost

Zdrojem této závady je fakt, že u reálného rotoru nelze dosáhnout takové situace, ve které by se těžiště nacházelo přesně na ose rotace. To způsobuje zvýšené namáhání jednotlivých částí rotoru, ložisek i nosné konstrukce. Předějit tomu lze pomocí vyvažování, které je prováděno buď u výrobce nebo v servisní organizaci. [4]

a) Silová (statická) nevyváženost

Rotor strojního zařízení je staticky nevyvážený tehdy, když hlavní osa rotace je rovnoběžná s hlavní osou setrvačnosti a těžiště je mimo osu rotace. Tento typ nevyváženosti je označován jako statický proto, že se projevuje, i když se rotor netočí. Jeho těžiště je posunuté pod osu rotace, a proto rotor v klidovém stavu zaujme polohu, ve které je těžiště pod touto osou. [4]

Z grafu vibračního spektra lze tuto závadu odhalit díky velké amplitudě vibrací na první otáčkové frekvenci (1X). Korekce je prováděna pomocí jednoho vyvažovacího korekčního závaží v nulové rovině. [19]

b) Momentová (dvojicová) nevyváženost

K momentové nevyváženosti dojde, pokud těžiště rotoru je na ose rotace, ale osa rotace je různoběžná s osou setrvačnosti. To může způsobovat vysoké axiální vibrace spolu s radiálními. [4, 19]

Projevuje se velkou amplitudou na první otáčkové frekvenci, která se zvětšuje se čtvercem otáčkové frekvence (takže při zdvojnásobení otáčkové frekvence se zečtyřnásobí vibrace). Korekce je prováděna pomocí vyvažovacích korekčních závaží minimálně ve dvou rovinách. [19]

c) Dynamická (obecná) nevyváženost

Jedná se o nejčastější typ nevyváženosti. Nastane, pokud osa rotace a osa setrvačnosti jsou mimoběžné. Jedná se o kombinaci silové a momentové nevyváženosti. [4]

V grafu vibračního spektra se rovněž projevuje velkou amplitudou na první otáčkové frekvenci. Korekce je prováděna (stejně jako u momentové nevyváženosti) pomocí korekčních závaží minimálně ve dvou rovinách. [19]

Nesouosost

Nesouosost je způsobena špatným ustavením strojů (správné ustavení strojů zajišťuje to, že se rotory za provozu otáčejí ve správné poloze). Nesouosost může být napravena díky kontrole a korekci ustavení, např. pomocí ustavovacích podložek. Rozlišujeme dva základní typy nesouososti: [4]

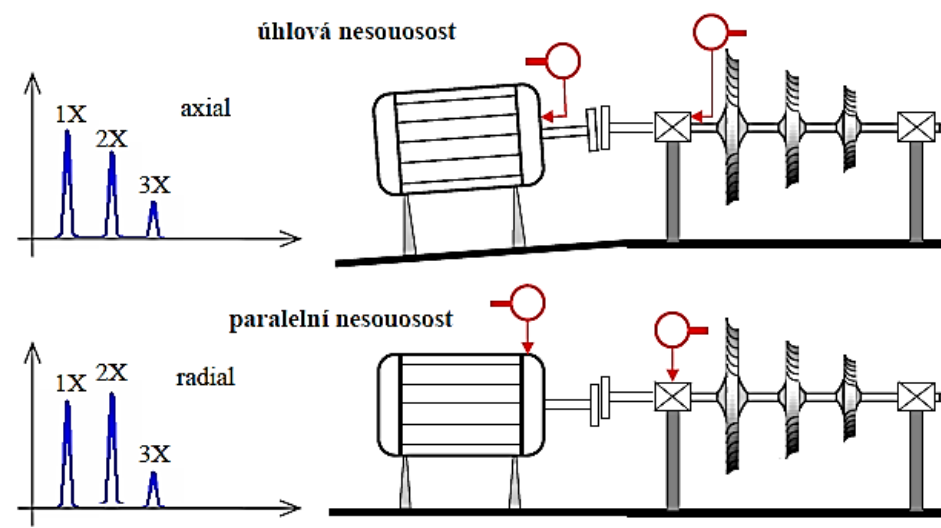
a) Úhlová nesouosost

Tato nesouosost je způsobena úhlovým posunutím osy rotoru a osy skříně. Je charakterizována velkými axiálními vibracemi na složkách 1X, 2X, případně i 3X a dalších (v případě výrazné úhlové nesouososti). [19]

b) Paralelní nesouosost

Tato nesouosost vzniká při paralelním posunutí osy rotoru a osy skříně. Má podobné příznaky jako úhlová nesouosost, ale vykazuje vysoké hodnoty radiálních vibrací na harmonických násobcích otáčkových frekvencí. Složka 2X je často větší než 1X. [19]

Úhlová i paralelní nesouosost (včetně jejich typických vibračních spekter) jsou zobrazeny na obr. 10. [4]



Obr. 10 – Úhlová a paralelní nesouosost [4]

Rezonance

K rezonanci dojde, když budící frekvence souhlasí s vlastní frekvencí celého systému. Může způsobit velmi výrazné zvýšení amplitudy vibrací kvůli rezonančnímu zesílení (následkem může být katastrofická porucha). Pokud se rotor nachází v rezonanci (případně v její blízkosti), nejlepším řešením je posun vlastní frekvence do vyšších nebo nižších hodnot. [19]

K odhalení rezonance pomáhá fakt, že vlastní frekvence se obvykle nemění se změnou otáčkové frekvence. [19]

Mechanické uvolnění

Mechanické uvolnění je obvykle způsobeno strukturním uvolněním patek stroje (či jejich měkkostí – tzv. měkká patka), nebo uvolněním rámu či šroubů ložiskového stojanu (či trhlinami v nich). Ve frekvenčním spektru se projeví velkou amplitudou na otáčkové frekvenci (1X), harmonických násobcích otáček (2X, 3X), případně i subharmonických násobcích (0,5X, 1,5X atd.). [4, 19]

Přidírání rotoru

V případě přidírání rotoru dochází k mírnému kontaktu rotoru se statorem. Často k tomu dochází při uvádění nového (či opraveného) strojního zařízení do provozu. [4]

Vibrační spektra vypadají v tomto případě obdobně jako u mechanického uvolnění (řada frekvencí, může budít i subharmonické složky atd.). Může být buď částečné (přidírání jen v jednom místě) nebo úplné (po celém obvodu po celou otáčku hřídele). V nejhorším případě může přidírání rotoru vést i ke katastrofické poruše. [19]

3.6.2 Nejběžnější závady kluzných ložisek

Ložisko je součást strojního zařízení, která zajišťuje vzájemnou polohu pevných a rotujících součástí, přenáší zatížení z rotující hřídele na jiné části stroje a snižuje tření v celé soustavě. Ložiska jsou obvykle nejpreciznější částí stroje (mívají desetkrát menší tolerance než zbylé části stroje). Základními typy ložisek jsou ložiska kluzná a ložiska valivá. [4, 20]

Kluzná ložiska jsou díky své jednoduché konstrukci a nízké ceně v průmyslové praxi hojně využívána. Často se jedná u jednoduchý válec (tzv. válcové ložisko), je však nutné vyřešit přívod a odvod mazacího oleje. [2, 4]

Velkou nevýhodou tohoto typu ložisek jsou nároky na dostatečné a kvalitní mazání, další nevýhodou jsou velké ztráty třením a náchylnost k zadření. Mezi nejběžnější závady kluzných ložisek patří problémy s vůlí, víření oleje (oil whirl) a tlučení oleje (oil whip). [2, 19]

Nadměrná vůle

Problémy s vůlí jsou způsobeny opotřebením ložiska (obvykle v pozdějších stádiích opotřebení). Projevují se přítomností více násobků otáčkové frekvence (klidně až 10X či 20X). Často se vyskytují vysoké amplitudy vibrací ve vertikálním směru (v porovnání s horizontálním). V některých případech je výrazná ale pouze špička u 1X. [19]

Nadměrná vůle může způsobit, že i malá nevyváženost či nesouosost povedou k velice výrazným vibracím. [19]

Nestabilita oleje – typ víření (whirl)

Tato závada se projevuje významným zvýšením vibrací na 0,40X – 0,48X. Víření oleje nastane, když olejový klín „tlačí“ na hřídel a tím budí vibrace. [19]

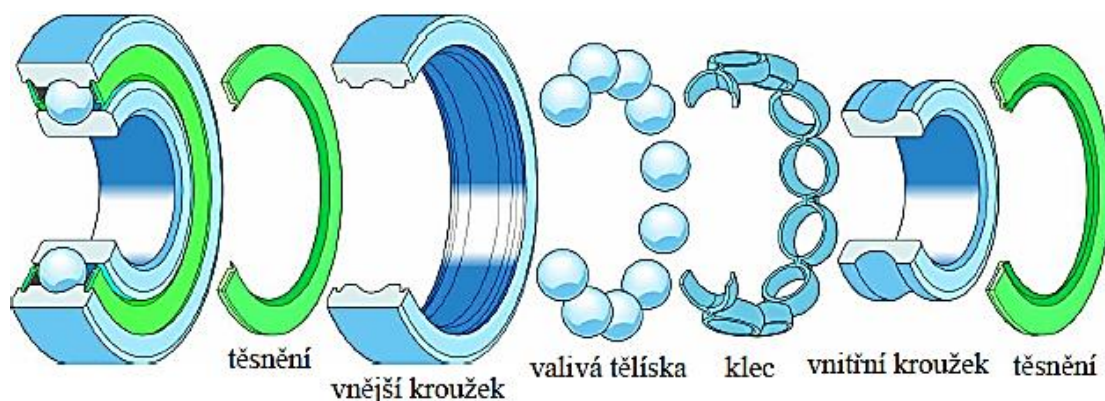
Nestabilita oleje – typ tlučení (whip)

Tlučení oleje obvykle nastává, když je strojní zařízení provozováno na (nebo nad) dvojnásobkem kritických otáček rotoru. V takovém případě může být frekvence víření oleje (whirl) blízká ke kritickým otáčkám rotoru a tím pádem budit rezonanci. [4, 19]

Tato závada vyvolává subharmonické vibrace s frekvencí rovnající se kritickým otáčkám rotoru. Může vést dokonce až ke katastrofické poruše. Nestabilita poté nezmizí ani při dalším zvýšení otáček rotoru (frekvenční špička ve spektru stále zůstává). Tím ji lze rozeznat od víření oleje – ani při zvyšování otáček se frekvenční špička nemění. [4, 19]

3.6.3 Nejběžnější závady valivých ložisek

Valivá ložiska obsahují valivé elementy (např. kuličky, válečky aj.), které se pohybují mezi vnitřním a vnějším kroužkem. Oproti klzným ložiskům mají výhody (jako např. nižší třecí ztráty či velkou spolehlivost), ale i nevýhody (vyšší cena, náročnější výroba). Konstrukce valivého ložiska je zachycena na obr. 11. [2]



Obr. 11 – Součásti valivého ložiska [4]

Závady na valivém ložisku se dělí do čtyř typů dle místa, na kterém dochází k výskytu dané závady. Těmto závadám odpovídají tzv. frekvence ložiskové závady, které lze spočítat ze vzorců. [4]

- BPFI – Závada na vnitřním kroužku,
- BPFO – Závada na vnějším kroužku,
- BSF – Závada na valivém elementu,
- FTF – Závada na kleci.

$$BPFI = \frac{N}{2} * \left(1 + \frac{B_d}{P_d} * \cos\varphi\right) * n, \quad (6)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} * \left(1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos\varphi\right) * n = N * FTF, \quad (7)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2 * B_d} * \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} * \cos\varphi\right)^2\right) * n, \quad (8)$$

$$FTF = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos\varphi\right) * n, \quad (9)$$

kde:

n ...otáčky rotoru [Hz],

N ...počet valivých elementů [-],

B_d ...průměr valivého elementu [mm],

P_d ...roztečný průměr valivého elementu [mm],

φ ...kontaktní úhel [°].

Závady na valivých ložiscích se v 80 % případů odehrávají dle stejného scénáře, skládajícího se ze 4 etap. [4, 19]

- **Etapa 1.** V první etapě se problémy ložisek dají indikovat v ultrazvukovém frekvenčním pásmu (250 kHz až 350 kHz). Poškození lze v této době detekovat např. pomocí metody AEE – viz kapitola 3.5.4 Měření a analýza obálky akustické emise (AEE).
- **Etapa 2.** Ve druhé etapě začínají malé vady v ložisku budit vlastní frekvence komponent ložiska (v oblasti 500 Hz až 2 kHz). V této době lze poškození již odhalit pomocí obálky zrychlení.
- **Etapa 3.** Ve třetí etapě se objevují frekvence ložiskových závad a jejich harmonické násobky. V této době lze poškození detekovat pomocí spekter rychlosti. Pokud závada dojde až do této etapy, je v tuto chvíli vhodné vyměnit ložisko.
- **Etapa 4.** Ve čtvrté etapě se ložisko dostává ke konci své životnosti. Je ovlivňována amplituda otáčkové složky 1X (tato amplituda roste). Ve frekvenčním spektru je pozorován „prahový šum“. V této etapě lze závada detekovat i sluchem a hmatem.

4 VŘETENO FRÉZOVACÍHO STROJE

Tato kapitola se věnuje vřetenu frézovacího stroje. Nejdříve je obecně popsána funkce vřetene a konstrukce vřetene, následně je analyzováno vřeteno Jäger, které je využívané strojem 2. Vřeteno Weiss, které je využívané strojem 1 a na kterém byla testována funkčnost přenosu dat a funkčnost měření hodnot, není (dle pokynů vedoucího diplomové práce) blíže rozebíráno, protože k němu nebyly spolupracující firmou dodány podklady. Dostal jsem pouze informaci, že vřeteno Weiss je obdobné jako vřeteno Jäger. Druhý typ vřetene (Jäger) byl poskytnut (včetně ložisek GMN) k rozebrání a proto na něj bylo možné se zaměřit.

Důraz je kladen zejména na ložiska vřetene Jäger, protože z pohledu vibrační diagnostiky jsou právě ložiska nejvýznamnější částí celého vřetene.

Vřeteno obráběcího stroje je část strojního zařízení, která zaručuje přesný otáčivý pohyb obrobku nebo nástroje. Vřetena se rozdělují do několika odlišných skupin v závislosti na typu strojního zařízení, jehož je dané vřeteno součástí. Uložena jsou ve vřeteníku. [21]

4.1 Funkce vřetene frézovacího stroje

U frézovacího stroje je hlavní úlohou vřetene zaručení přesného rotačního pohybu řezného nástroje, který je do vřetene upnut. Trajektorie pohybu nástroje se tedy musí co nejvíce blížit kružnici a od tohoto tvaru se odchylvat jen v přípustných mezích. [21]

Na vřetena jsou kladeny náročné požadavky: [21, 22]

- Přesnost chodu – ta je určena velikostí maximálního radiálního a axiálního házení.
- Nutnost dokonalého vedení (uložení) – když zatížení vřetene mění směr či smysl, vřeteno nesmí měnit svou polohu v prostoru.
- Ztráty v uložení vřetena musí být co možná nejmenší.
- Vřeteno musí být dostatečně tuhé – jeho deformace má významný vliv na přesnost práce strojního zařízení.

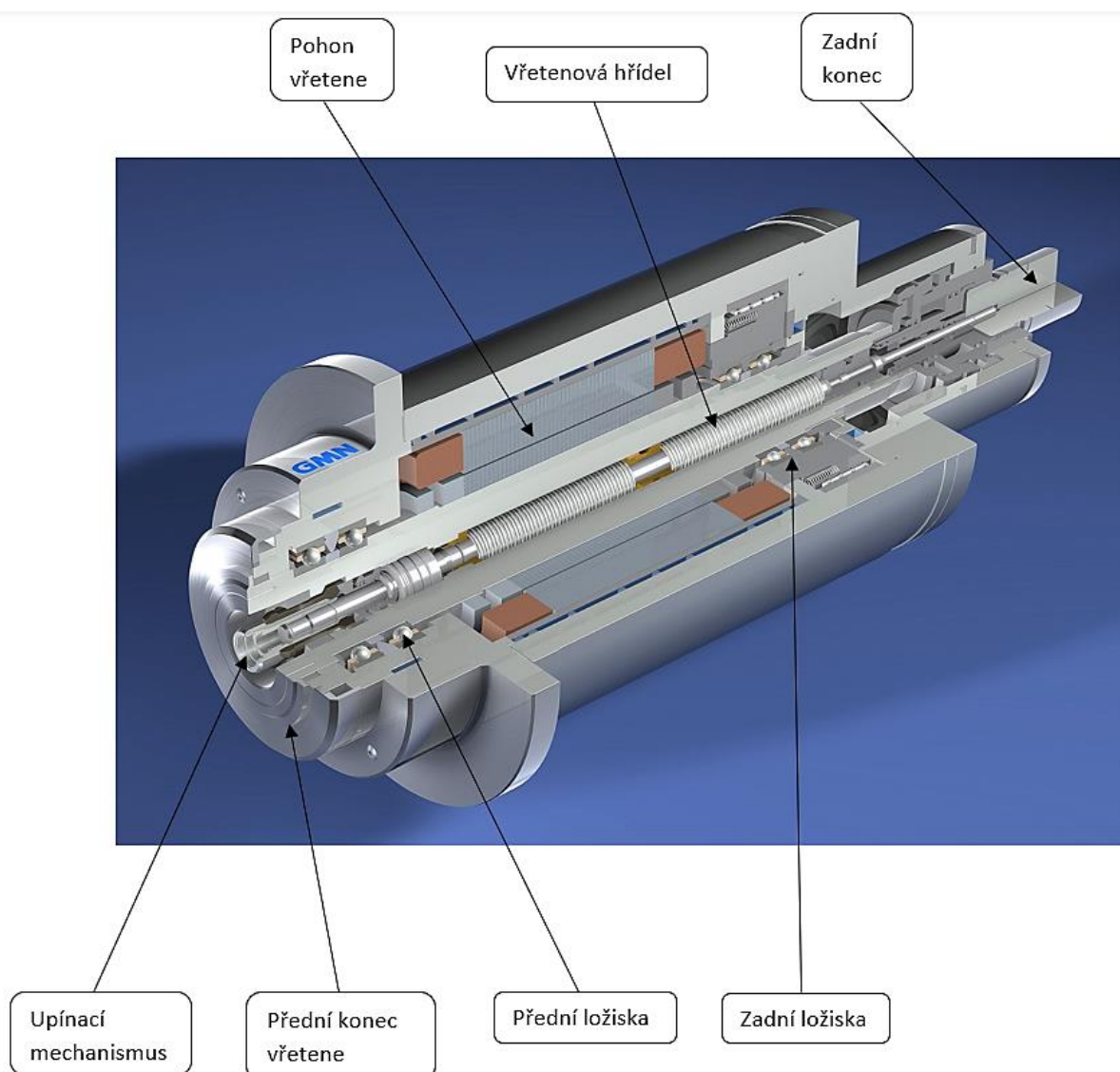
4.2 Konstrukce vřetene frézovacího stroje

Vřeteno frézovacího stroje se skládá z náhonu vřetene, vřetenové hřídele (v ní je upínací plocha s mechanismem pro upnutí nástroje – nejčastěji upínací kužel), chladicího mechanismu a pláště (skříně či válcového tubusu). [21]

K uložení vřetene frézovacího stroje slouží dvě radiální ložiska a jedno či dvě axiální ložiska. Konec vřetene vyčnívající ze skříně vřeteníku (přední konec vřetene) je využíván k nasazení nástroje (pomocí již zmíněného upínacího mechanismu). Ložiska nejbližší k přednímu konci vřetene (označována jako hlavní ložiska či přední ložiska) mají na přesnost rotačního pohybu vřetene rozhodující vliv. [22]

K pohonu vřetene se využívá několik rozdílných principů. Na obr. 12 je zobrazen řez elektrovřetenem GMN, které je poháněno pomocí vestavěného elektromotoru. Obrázek obsahuje popis základních částí vřetene. Kromě tohoto konstrukčního principu se dále k pohonu vřeten používají: [22]

- pohon pomocí řemene,
- přímé spojení motoru s vřetenem přes spojku,
- přímé spojení motoru s vloženou převodovkou přes spojku,
- motor s vloženou řadicí převodovkou.



Obr. 12 – Popis základních částí elektrovřetene [23]

4.3 Vysokofrekvenční vřeteno Jäger

Do stroje M8Cube, na kterém byla zaváděna online vibrační diagnostika (stroj 2), bylo instalováno vysokofrekvenční vřeteno Jäger. Jedná se o vřeteno typu Z80-D460.02 S5 s pneumatickou přímou výměnou nástroje. Toto vřeteno je kvalitní a přesný nástroj vhodný pro vysokorychlostní obrábění. Poháněno je vestavěným elektromotorem.[24]

Vřeteno samo o sobě je „neúplným strojem“. Je možné ho provozovat pouze s obráběcím strojem a měničem kmitočtu (frekvenčním měničem). [24]

Jmenovité otáčky tohoto vřetene jsou $60\,000\text{ min}^{-1}$. Jmenovitý výkon poté 2 kW. Chlazení vřetene probíhá za pomoci chladicí kapaliny na bázi alkoholu. Vřeteno obsahuje kuličková ložiska od firmy GMN. [24, 25]

Na obr. 13 je zobrazeno vysokofrekvenční vřeteno Jäger. [24]



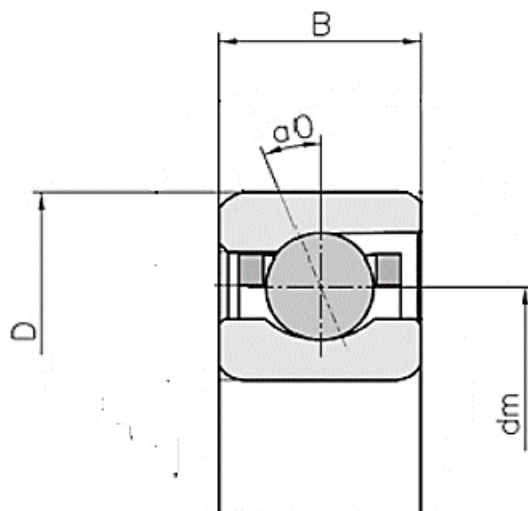
Obr. 13 – Vysokofrekvenční vřeteno Jäger – pohled z boku a zezadu [24]

Čísly 1 a 2 jsou označeny přípojky VF-vřetene. Číslem 1 je označena elektrická přípojka. Číslem 2 je označena přípojka pro přívod chladicí kapaliny (teplota vřetene by neměla být vyšší než $+45\text{ °C}$, v opačném případě hrozí zkrácení životnosti ložisek). Z druhé strany jsou další dvě přípojky, jedna z nich opět pro chladicí vodu, druhá pro „blokovací vzduch“. [24]

4.3.1 Ložiska vřetene Jäger

Z pohledu vibrodiagnostiky jsou pravděpodobně nejvýznamnější částí vřetene stroje jeho ložiska. Ložiska GMN, která jsou používána vřetenem Jäger 2 kW, jsou typu HY BNS SM 04843 a HY SM 04843 (jedná se o hybridní vřetenová ložiska pro vyšší rychlosti).

Popis ložiska lze vidět na obr. 14. [25]



Obr. 14 – Kuličkové ložisko [25]

Legenda (popsány jsou jen základní rozměry):

- dm Roztečný průměr (značen P_d) [mm],
- D vnější průměr ložiska [mm],
- α_0 kontaktní úhel [°],
- B šířka ložiska [mm].

Ložisko HY SM 04843 lze vidět na obr. 15. Ložisko HY BNS SM 04843 je mu velmi podobné, souhlasí i jejich rozměry.



Obr.15 – Kuličkové ložisko HY SM 04843

Označení HY vypovídá o tom, že materiálem valivých elementů (kuliček) je nitrid křemičitý (Silicon nitride). SM značí, že se jedná o vysokorychlostní ložisko. Oba typy ložiska jsou vyrobené na zakázku do tohoto typu vřetene. [25]

Každé z ložisek obsahuje 14 keramických kuliček (N). Průměr jedné kuličky (B_d) je 4,762 mm. Roztečný průměr (P_d) je poté 18 mm. Kontaktní úhel (φ) je 15°. [25]

Dosazením do rovnic (6), (7), (8) a (9) (viz podkapitola 3.6.3 Nejběžnější závady valivých ložisek) lze vypočítat frekvence ložiskových závad.

Obecné vyjádření frekvencí ložiskových závad poté vychází:

$$BPFI = 8,79 * n \text{ Hz},$$

$$BPFO = 5,21 * n \text{ Hz},$$

$$BSF = 1,77 * n \text{ Hz},$$

$$FTF = 0,37 * n \text{ Hz}.$$

Při dosazení rychlosti odpovídající 90 % maximálních otáček vřetene – tedy 54 000 RPM (900 Hz) – vychází frekvence ložiskových závad:

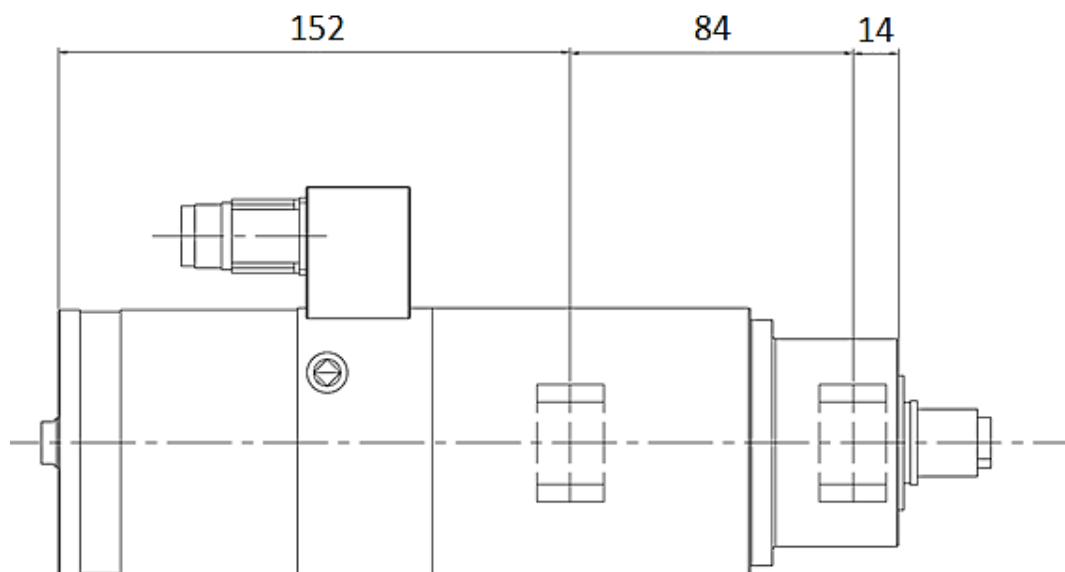
$$BPFI = 7910 \text{ Hz},$$

$$BPFO = 4690 \text{ Hz},$$

$$BSF = 1590 \text{ Hz},$$

$$FTF = 335 \text{ Hz}.$$

Umístění ložisek v tomto typu vřetene je zobrazeno na obr. 16. Výkres byl vytvořen pomocí studentské verze programu AutoCAD.



Obr. 16 – Umístění ložisek ve vřetenu Jäger 2kW

5 ONLINE SYSTÉM VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY

V této kapitole je popsán online systém vibrační diagnostiky SKF, založený na měřicím systému IMx-8 (dále jen Systém). Ten byl nejdříve otestován na stroji 1 (s vřetenem Weiss) ve firmě DATRON-TECHNOLOGY CZ s.r.o. – konkrétně v jejím obchodním centru v Brně (dále jen DATRON). Poté byl zaveden do stroje 2 (s vřetenem Jäger) ve firmě, která byla vedením společnosti DATRON určena za testovací firmu. Také zde je popsán stav technické diagnostiky stroje před zavedením online vibrační diagnostiky.

5.1 Představení společnosti a diagnostikovaného zařízení

Společnost DATRON AG se zabývá hned několika podnikatelskými aktivitami, pro účely této diplomové práce je však nejpodstatnější výroba CNC obráběcích strojů pro vysokorychlostní frézování neželezných kovů a plastů. Společnost DATRON-TECHNOLOGY CZ s.r.o. (v jejímž obchodním centru se stroj 1 nachází) distribuuje jejich výrobky.

V praktické části této práce je zaveden systém online vibrační diagnostiky na dva CNC frézovací stroje DATRON M8Cube (viz obr. 17, na kterém je zachycen stroj 1). To je vysoce výkonný HSC (High speed cutting) frézovací stroj umožňující frézování, vrtání či gravírování. Toto strojní zařízení obsahuje vysokofrekvenční vřetenem (v případě stroje 1 je to vřetenem Weiss, v případě stroje 2 je to vřetenem Jäger viz kapitola 4.3 Vysokofrekvenční vřetenem Jäger).

Souřadnicový stůl tohoto zařízení je polymer-betonový s ocelovým základem. Pohon je zajištěn pomocí dynamických bezkartáčových pohonů. Rozměry stroje jsou 1 740 mm x 1 950 mm x 1 740 mm (šířka x výška x tloušťka). Ovládání je realizováno skrze rozhraní na bázi systému Windows. [26]



Obr. 17 – CNC frézovací zařízení DATRON M8Cube [26]

5.2 Současný stav technické diagnostiky stroje

V této podkapitole je popsáno, jakým způsobem byla prováděna technická diagnostika stroje DATRON M8Cube před zavedením online vibrační diagnostiky.

Vibrační diagnostika na tomto výrobním stroji nebyla doposud prováděna. Byly ale použity jiné metody technické diagnostiky – kruhová interpolace (testování pomocí systému Ballbar), měření kolmosti vřetene, měření upínací síly a měření zatížení vřetene.

Největší důraz byl při technické diagnostice na tomto zařízení kladen na kontroly pomocí systému Ballbar – tzv. kruhová interpolace. Tyto kontroly byly provedeny při každé údržbě (tedy v pravidelných intervalech), dále pak před převozem stroje a po převozu stroje (aby bylo zjištěno, zda zařízení během cesty nebylo poškozeno). Další kontroly byly prováděny v případě zájmu zákazníka.

Testování Ballbarem spočívá v porovnání kruhové dráhy, kterou provedl stroj, s kruhovou dráhou, kterou stroj podle použitého programu provést měl. Výsledkem tohoto testu je zjištění odchylky (v μm) od ideálního tvaru (kružnice). Kruhová interpolace pomocí Ballbaru je zobrazena na obr. 18. [27]



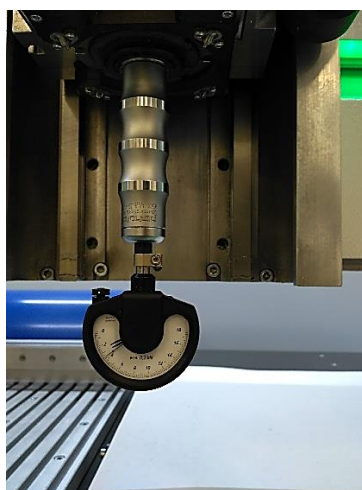
Obr. 18 – Kruhová interpolace pomocí Ballbaru [27]

Co se týká samotného vřetene stroje, byl aplikován zejména reaktivní typ údržby. Když vřeteno přestalo vyhovovat, byl při jeho výměně vyplněn checklist firmy DATRON obsahující otázky ohledně provozních podmínek vřetene (např. zda bylo vřeteno vždy před použitím zahříváno, jestli byly nástroje vyváženy, v jakém rozsahu RPM stroj pracoval aj.). Tento checklist byl vyplněn pro staré (defektní) vřeteno a podobný checklist byl vyplněn i pro nové (nebo ve většině případů spíše starší, již použité, vřeteno, které výrobcem bylo opraveno).

Přirozeně nemá význam ptát se např., zda bylo nové vřeteno zahříváno před použitím. Některé důležité otázky ale lze aplikovat na staré i nové vřeteno a tímto způsobem je porovnat. Mezi důležité otázky v tomto checklistu patří např. otázka na hlučnost stroje. Ta je jedním z hlavních ukazatelů technického stavu vřetena. Hlučnost však není přímo měřena (např. pomocí akustické intenzity) z ekonomických důvodů, spíše je spoléháno na schopnost obsluhy stroje rozeznat rozdíl ve zvuku, který dobré a špatné vřeteno vydává. Hodnocení hlučnosti je tedy velmi subjektivní.

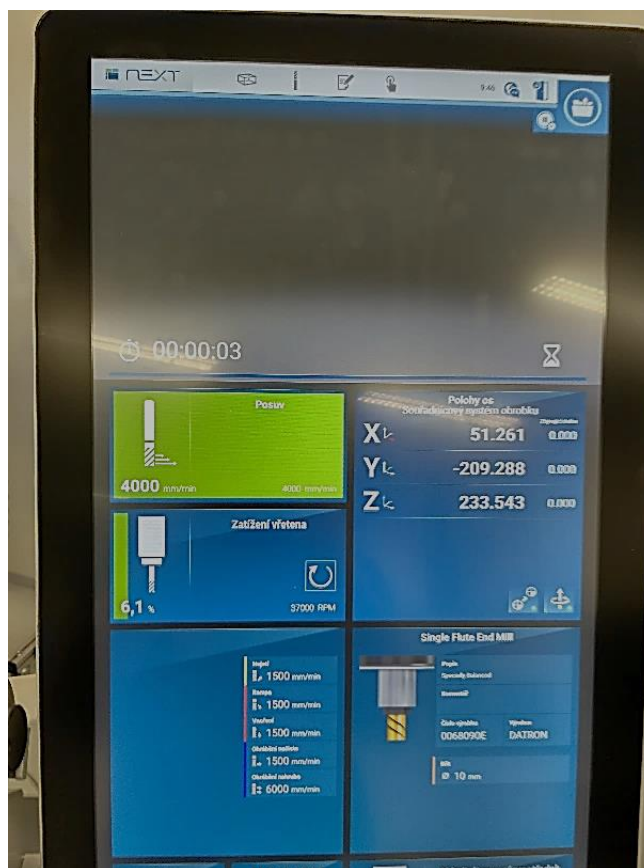
Další důležitou otázkou obsaženou v checklistu je otázka na kolmost vřetene. Je změřena odchylka Z-X a Z-Y (v μm) a ta je poté porovnána s maximální dovolenou odchylkou.

U některých typů vřeten je rovněž měřena i upínací síla frézy (v kN) pomocí měřiče upínací síly. Tento měřič je upnut do vřetene místo nástroje a následně může být upínací síla, naměřená tímto měřičem, porovnána s minimální a maximální dovolenou mezí. Toto měření je zobrazeno na obr. 19. I otázka na toto měření je součástí checklistu.



Obr. 19 – Měření upínací síly

Další metodou technické diagnostiky je schopnost samotného strojního zařízení DATRON M8Cube změřit zatížení vřetene (v procentech). U každého typu vřetene je specifikováno maximální zatížení a to umožňuje obsluze stroje mít představu o stavu používaného vřetene. Pohled na monitor zařízení (na kterém je v prostřední části vlevo zobrazeno aktuální zatížení vřetene) je zobrazen na obr. 20 (zatížení je v tomto případě 6,1 %).



Obr. 20 – Aktuální zatížení vřetene

5.3 Popis online systému vibrační diagnostiky

Během září a října 2018 bylo provedeno zavedení a testování funkčnosti Systému na stroji 1.

Systém obsahoval tyto komponenty:

1. osmikanálový měřicí systém SKF Multilog IMx-8 (CMON 4108) – 1 ks,
2. vysokofrekvenční snímač s bočním výstupem CMAC244-1D – 3 ks,
3. 10 m dlouhý kabel s konektorem CMCB 108-MIL-10m – 3 ks,
4. skříňka pro jednotku CMON 4150, propojená, včetně napájecího zdroje – 1 ks,
5. instalační materiál – 1 ks.

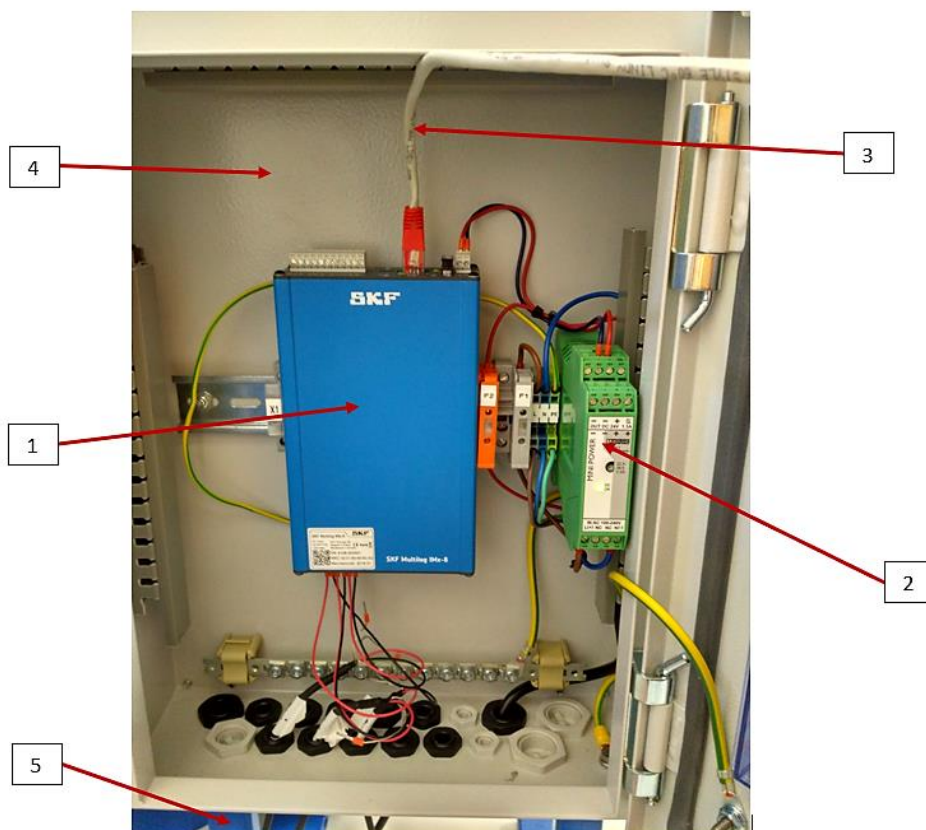
Cílem tohoto testování bylo:

1. ověření funkčnosti všech snímačů,
2. ověření funkčnosti propojovacích kabelů,
3. ověření funkčnosti osmikanálového měřicího systému SKF Multilog IMx-8 (dále jen IMx-8),
4. ověření bezproblémového přenosu dat do vytvořeného serveru umístěného v budově A1 VUT FSI,
5. ověřit možnosti zpracování naměřených dat pomocí softwaru SKF @ptitude Observer 10.5.0 (dále jen @ptitude Observer).

Základem Systému je měřicí systém IMx-8, vložený do skříňky CMON 4150, která byla upevněna do kovového stojanu (viz obr. 21). Následně byly na vřeteno frézovacího zařízení DATRON M8Cube připevněny 3 snímače typu CMAC244-1D. Umístění snímačů (i s fotodokumentací) je blíže popsáno v podkapitole 5.3.2 Umístění snímačů. Místa umístění snímačů byla zvolena co možná nejbližší k ložiskům vřetene. Snímače č.1 a č.2 byly uchyceny pomocí lepidla X60 od firmy HBM (viz kapitola 3.4.3, konkrétně části „Upevnění snímačů vibrací“ a „Dvousložkové lepidlo HBM X60“). Třetí snímač byl uchycen pomocí magnetu. Důvodem byly obavy vedení firmy, že by lepidlo mohlo z měřicího místa zatéct dovnitř a způsobit poškození.

Následně byly snímače propojeny s měřicím systémem IMx-8 pomocí tří propojovacích kabelů CMCB 108-MIL-10m (viz obr. 22). Tyto propojovací kabely byly následně označeny štítky v prostoru vřetene i v prostoru skříňky CMON 4150:

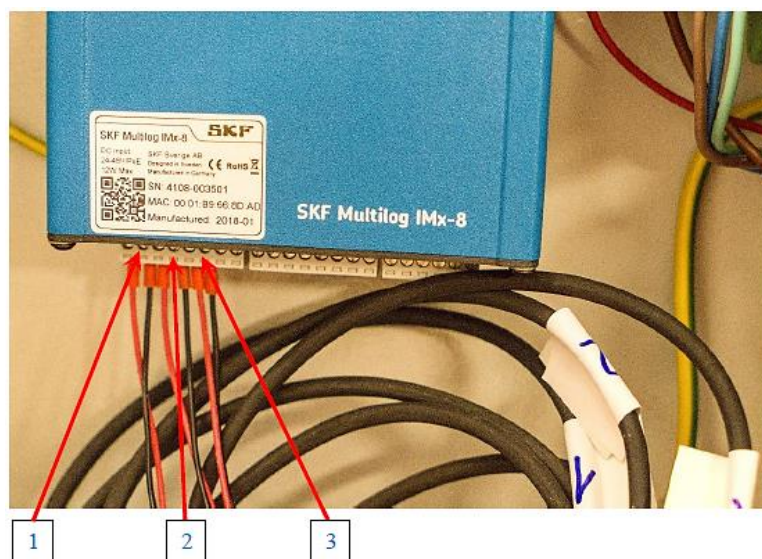
- štítek č. 1 – kabel určený pro snímač č. 1 (sériové číslo 2982),
- štítek č. 2 – kabel určený pro snímač č. 2 (sériové číslo 2983),
- štítek č. 3 – kabel určený pro snímač č. 3 (sériové číslo 2988).



Obr. 21 – IMx-8 nainstalovaný ve skříni CMON 4150

Legenda:

1. měřicí systém IMx-8,
2. napájecí zdroj MINI-PS-100-240AC/24DC/1.3,
3. kabel pro připojení k internetu,
4. skříň pro jednotku CMON 4150,
5. kovový svařovaný stojan.



Obr. 22 – Detail připojení jednotlivých snímačů [18]

Legenda:

1. snímač č.1 (radiální směr č. 1),
2. snímač č. 2 (radiální směr č. 2),
3. snímač č. 3 (axiální směr).

5.3.1 Hlavní komponenty Systému

V této podkapitole jsou popsány hlavní parametry základních komponent Systému, tedy měřicího systému IMx-8 a vysokofrekvenčních snímačů s bočním výstupem CMAC244-1D. Využity k tomu byly technické informační zdroje firmy SKF.

Osmikanálový měřicí systém SKF Multilog IMx-8

Měřicí systém IMx-8 (obr. 23) je kompaktní zařízení určené pro včasné zjišťování poruch. Obsahuje osm analogových vstupů a také dva digitální kanály s možností připojení jak k mobilním zařízením, tak i k přenosným počítačům. To usnadňuje následnou konfiguraci a monitorování. [28]

Po připojení k serveru, který je vybavený softwarem @ptitude Observer, tvoří IMx-8 úplný nástroj pro monitorování stavu rotačních strojních zařízení. Z nasbíraných dat lze vytvářet trendy, grafy spekter a další zdroje informací o změnách stavu zařízení. Pomocí následné analýzy je zajištěna včasná identifikace potenciálních poškození a následné zabránění případné poruše. [28]



Obr. 23 – Osmikanálový měřicí systém SKF Multilog IMx-8 [28]

Síťové nastavení tohoto zařízení lze provést ideálně pomocí tabletu či chytrého mobilního telefonu (s operačním systémem Android nebo iOS) - konkrétně pomocí aplikace IMx Manager. [28]

Vysokofrekvenční snímač s bočním výstupem CMAC244-1D

Pro měření zvolených parametrů vibrační diagnostiky (zrychlení vibrací, rychlosti vibrací a obálky zrychlení) byl zvolen vysokofrekvenční snímač s bočním výstupem typu CMAC244-1D (viz obr. 24). Standartní citlivost tohoto snímače je 100 mV/g (ale u jednotlivých snímačů se tento parametr může mírně lišit). [28]

Na vysokofrekvenční vřeteno stroje DATRON M8Cube byly připevněny 3 akcelerometry tohoto typu. Jejich sériová čísla a citlivosti jsou:

- snímač CMAC244-1D, sériové číslo 2982, citlivost 97,33 mV/g – označení v databázi A1,
- snímač CMAC244-1D, sériové číslo 2983, citlivost 97,72 mV/g – označení v databázi R1,
- snímač CMAC244-1D, sériové číslo 2988, citlivost 97,72 mV/g – označení v databázi R2.

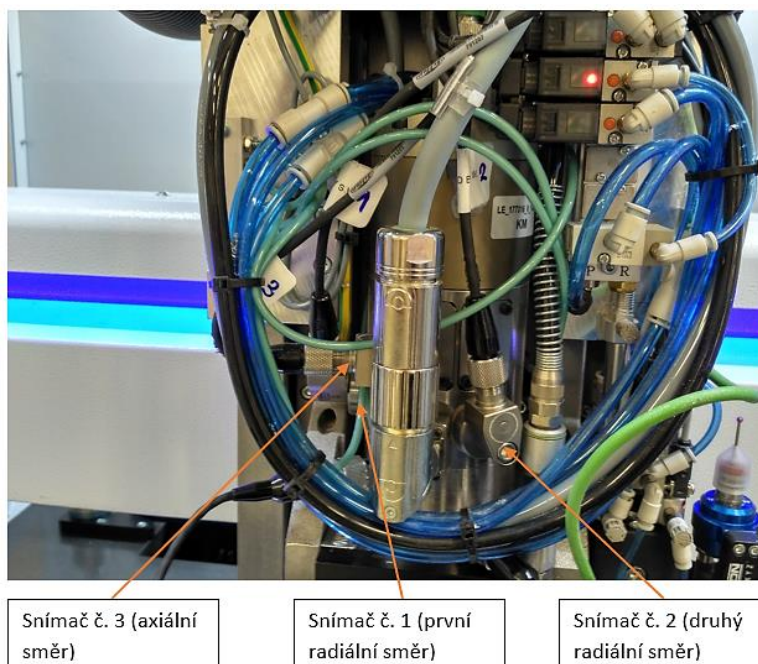


Obr. 24 – Snímač CMAC244-1D [28]

5.3.2 Umístění snímačů

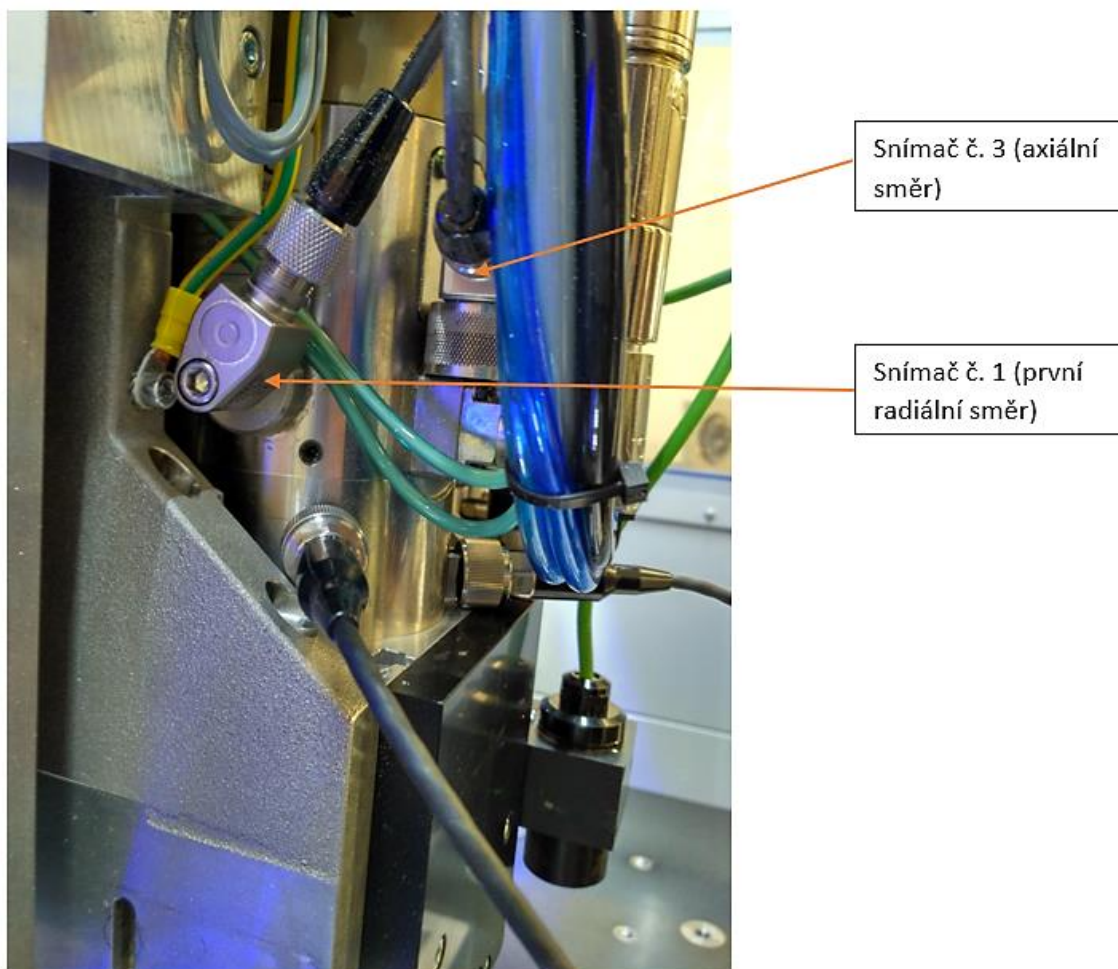
Snímače byly na CNC frézovacím stroji DATRON M8Cube ve firmě DATRON (stroji 1) umístěny co možná nej přesněji dle pokynů v normě ČSN ISO 20816-1.

Umístění snímačů na stroji 1 ze dne 20.9.2018, kdy proběhla instalace Systému, je zachyceno na obr. 25.



Obr. 25 - Umístění snímačů na strojním zařízení ve firmě DATRON

Jak je z obrázku patrné, snímač, ke kterému vede kabel označený číslem 3, měří hodnoty vibrací v axiálním směru. Snímače, ke kterým vedou kabely označené čísly 1 a 2, měří vibrace v radiálních směrech. Pro větší názornost je na obr. 26 zobrazen detail snímačů 1 a 3, které na předchozím obrázku nelze příliš vidět.



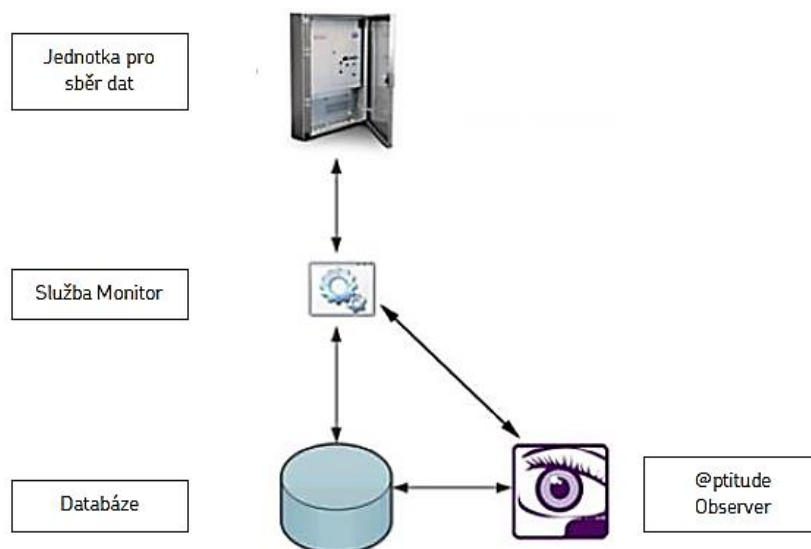
Obr. 26 – Detail snímačů 1 a 3

Poznámka – Snímač vlevo nahoře je snímač 1, měřící hodnoty zrychlení vibrací v radiálním směru. Snímač vpravo nahoře je snímač 3, měřící hodnoty zrychlení vibrací v axiálním směru. Snímače dole nepatří k Systému. Jsou to snímače, kterými byl ve chvíli zachycení obrázku na místě měřeny hodnoty zrychlení vibrací pomocí analyzátoru MICROLOG souběžně s online měřením.

5.3.3 SKF @ptitude Observer

@ptitude Observer patří do rodiny softwarových aplikací SKF @ptitude Monitoring Suite. Ta se zaměřuje na spolehlivost strojních zařízení (management a analýza naměřených dat pro účely monitorování technického stavu strojů a zařízení) a program @ptitude Observer je jejím základním programem. [29]

Analýza dat pro účely této diplomové práce byla prováděna za pomoci právě tohoto programu. Logická architektura programu @ptitude Observer je zobrazena na obr. 27. [29]



Obr. 27 – Logická architektura SKF @ptitude Observer [29]

Pro správné fungování musí mít jednotka IMx-8 zajištěnou komunikační cestu do @ptitude Observer Monitoru. Služba Monitor, databáze a program @ptitude Observer poté již mohou být na stejném počítači, nebo mohou být i fyzicky separovány, pokud jsou na stejné síti. [29]

Komunikační cesta mezi jednotkou IMx-8 (případně jinou jednotkou IMx či MasCon) musí být TCP/IP kompatibilní. Použit lze např. optický kabel, internet či standardní Ethernetovou síť. V případě této diplomové práce byla použita technologie spojení pomocí internetu. [29]

Pomocí programu @ptitude Observer lze např. zobrazovat data v různých grafech (graf spektra, graf časové vlny), sledovat trend, nastavovat poplachy (pokud hodnoty měřené veličiny překročí určitou úroveň) a také zachytávat „zachycené události“ neboli „Events“ (tím se rozumí měření omezené časové vlny, které lze využít pro kontinuální zachycení dat před a po události). [29]

Postup instalace programu @ptitude Observer (včetně následného připojení testovací databáze) je popsán v příloze 1. Popis uživatelského rozhraní v tomto programu je poté obsažen v příloze 2.

5.3.4 Testovací databáze

Při konfiguraci programu @ptitude Observer musí být sestaven hierarchický systém (od případných různých výrobních závodů přes jednotlivé stroje až po měřicí body na každém stroji), aby byl systém monitorování stavu správně organizovaný a přehledný. Význam hierarchického systému spočívá ve vytvoření logických skupin ze všech měření. Následně jsou nastaveny jednotlivé měřicí body (a případně i poplachy viz podkapitola 3.4.4 Měření a vyhodnocování vibrací strojů) či vícenásobné měřicí body. [29]

Databáze je nejvyšší logická úroveň hierarchického systému. Může být buď vytvořena nová databáze, nebo může být připojena externí databáze (pomocí programu @ptitude Observer Database Administrator). [29]

V případě testování Systému byla testovací databáze vytvořena s přihlédnutím k následujícím metodám měření vibrací: [18]

1. Zrychlení vibrací (v databázi označení **ACC**)

- pro určení mechanického stavu stroje DATRON M8Cube a stavu mazání,
- měření vždy ve třech směrech – horizontálním směru (na obr. 25 a na obr. 26 je to radiální směr č.1 měřený snímačem označeným č.1), vertikálním směru (na obr. 25 a na obr. 26 je to radiální směr č.2 měřený snímačem č.2) a axiálním (na obr. 25 a na obr. 26 je to axiální směr měřený snímačem č.3),
- hodnocena je celková hodnota zrychlení vibrací, FFT spektrum (rozklad na jednotlivé frekvenční složky při dané amplitudě) a také časový vzorek signálů.

2. Rychlost vibrací (v databázi označení **VEL**)

- pro určení mechanického stavu strojního zařízení DATRON M8Cube,
- měření probíhá také vždy ve 3 směrech (stejně jako při měření zrychlení vibrací) – horizontálním směru, vertikálním směru a axiálním směru,
- hodnocena je celková hodnota rychlosti vibrací (dle normy ČSN ISO 20816-1), FFT spektrum a také časový vzorek signálů.

3. Obálka signálu zrychlení (v databázi označení **EN**)

- měření za účelem zjištění stavu ložisek, případně i stavu mazání,
- měření probíhá opět vždy ve 3 směrech – horizontálním, vertikálním a axiálním,
- hodnocena je celková hodnota obálky zrychlení, FFT spektrum a také časový vzorek signálů.

Navíc byly pro měřené parametry použity různé měřicí rozsahy (případně filtrované měřicí rozsahy) s ohledem na to, aby mohl být spolehlivě zjištěn mechanický stav zařízení DATRON M8Cube (stroje 1) a stejně tak i stav ložisek tohoto zařízení. To je zachyceno v tab. 1. [18]

Tab. 1 – Přehled použitých metod a příslušných rozsahů měření vibrací [18]

Metoda	Popis	Detekce
ACC 10k	zrychlení vibrací v pásmu do 10000 Hz, 6400 čar	efektivní hodnota
ACC 20k	zrychlení vibrací v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar	efektivní hodnota
ACC 30k	zrychlení vibrací v pásmu do 40000 Hz, 6400 čar	efektivní hodnota
VEL 2k	rychlost vibrací v pásmu do 2000 Hz, 3200 čar	efektivní hodnota
VEL 5k	rychlost vibrací v pásmu do 5000 Hz, 3200 čar	efektivní hodnota
EN3 20k	obálka zrychlení III (500-10000 Hz), v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar	špička-špička
EN4 20k	obálka zrychlení IV (5-40 kHz), v pásmu do 20000 Hz, 6400 čar	špička-špička
EN4 40k	obálka zrychlení IV (5-40 kHz), v pásmu do 40000 Hz, 6400 čar	špička-špička

Počet spektrálních čar říká, na kolik částí bude frekvenční spektrum rozděleno (čím více je čar, na tím více částí bude spektrum rozděleno). V rámci jedné části nelze jednotlivé

frekvenční složky rozlišit. Zjednodušeně lze tedy říci, že počet spektrálních čar určuje šířku (v Hz) každého pásma. [4]

Proto je důležité, aby bylo frekvenční rozlišení dostatečně jemné a jednotlivé složky byly rozlišitelné. Na druhou stranu ale platí, že čím více je spektrálních čar, tím náročnější je analýza a vyhodnocování výsledků měření (a zároveň je delší i doba potřebná pro vyhodnocování). [4]

Je tedy třeba vzít v úvahu, jak moc blízké frekvence se ve výsledném spektru mohou vyskytovat a podle toho rozhodnout o frekvenčním rozlišení (počtu spektrálních čar).

Číslování obálek zrychlení (v tomto případě EN3 a EN4) bylo převzato z tab. 2. [5]

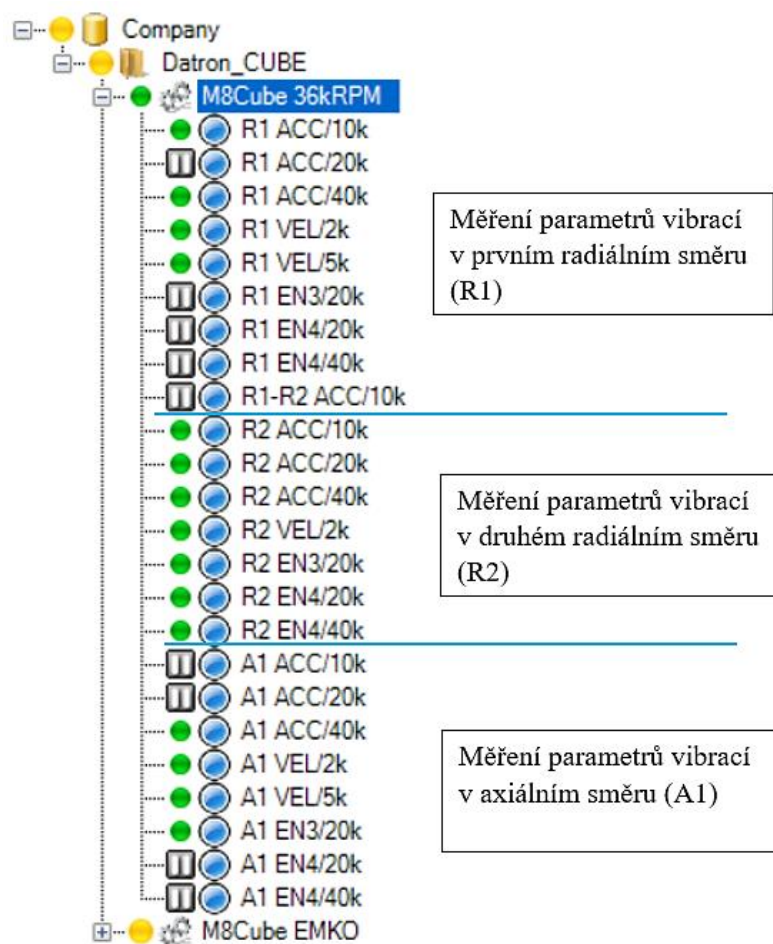
Tab. 2 – Obálka zrychlení zařízení [5]

Měření a analýza	Analyzovaná oblast ➤ způsob analýzy	Detekované závady
➤ obálky zrychlení,	5 Hz - 100 Hz 50 Hz - 1 000 Hz 500 Hz - 10 000 Hz 5 000 Hz - 40 000 Hz časový průběh a jeho celková hodnota frekvenční spektrum (a jeho celková hodnota)	defekty ložisek (2. fáze - pitting) poškození zubů v převodovkách poškození izolace elektrických motorů poškození vinutí elektromotorů

S přihlédnutím ke všem těmto aspektům byla v programu @ptitude Observer vytvořena zkušební databáze (pojmenovaná „M8Cube 36kRPM“) pro testování Systému na stroji 1 sestávající z měřících bodů uvedených na obr. 28.

Měřicí body označené jako R1 slouží k měření parametrů vibrací (jejich zrychlení, rychlosti a obálky zrychlení) v prvním radiálním směru (snímač č. 1 na obr. 25 a obr. 26). Měřicí body označené jako R2 slouží k měření vibračních parametrů ve druhém radiálním směru (snímač č. 2 na obr. 25 a obr. 26). Nakonec měřicí body označené A1 slouží k měření parametrů vibrací v axiálním směru (snímač č. 3 na obr. 25 a na obr. 26).

Poznámka: Databáze je pojmenována M8Cube 36kRPM, protože při ověřování funkčnosti Systému byly otáčky vřetena stroje 1 nastaveny na hodnotu 36 000 otáček za minutu. Tato hodnota byla zvolena proto, že dle dohody s vedením firmy je při zkušebním chodu stroje použita otáčková rychlost rovná 90 % maximálních otáček vřetene (v tomto případě 90 % z maximálních 40 000 otáček za minutu je právě 36 000).



Obr. 28 – Zkušební databáze

5.3.5 Měřicí body

Správné nastavení měřicích bodů je pro správnou funkci systému online vibrační diagnostiky klíčové. Prováděno je pomocí programu @ptitude Observer. Rozhraní nastavování měřicích bodů je zobrazeno na obr. 29.

Obr. 29 – Vlastnosti měřicího bodu – Sběr - program @ptitude Observer

Nejdříve je nutné zvolit typ měřicího bodu. Body pro měření zrychlení vibrací a rychlosti vibrací jsou typu „Dynamická“, body pro měření obálky zrychlení jsou typu „Dynamická, obálka“.

Dále je nutné provést nastavení konkrétního měřicího bodu. Některá z nastavení je nezbytné vyplnit, některá z nastavení jsou pouze nepovinná. V záložce „Obecný“ je důležité zadat jméno měřicího bodu, označení jednotky IMx a počet kanálů (většina použitých bodů v testovací databázi je jednobanových, výjimkou je bod R1-R2 ACC/10k, který je dvoubanových) a zvolení konkrétního kanálu (Snímač č. 1, č. 2 nebo č. 3).

Další záložkou je záložka „Sběr“, viz obr. 29. Klíčovými nastaveními jsou zde počet čar (minimální počet spektrálních čar je 100, maximální softwarem povolené množství je 6 400), frekvenční rozsah (ten je v případě tohoto měření zmíněn již v samotném názvu měřicího bodu – zde je nastavován měřicí bod R1 ACC/10k, frekvenční rozsah je tedy 0 – 10 kHz), volba okna (viz kapitola 3.5.1, konkrétně část „Chyba únikem“), dolní mezní frekvence a typ ukládání (zde se nastavuje, zda se má ukládat časová vlna, frekvenční spektrum atd. – pro optimální

výkonnost je doporučeno ukládat časovou vlnu – tedy závislost hodnoty měřeného parametru vibrací na čase – a další parametry software případně dopočítá).

Dále se v této záložce konfiguruje trend, konkrétně počet čar, udávaná jednotka, aplikace měřítka (špička, peak to peak či efektivní hodnota).

Třetí záložkou jsou „Provozní a paměťové podmínky“. Pod touto záložkou lze např. definovat, zda se pro daný měřicí bod mají použít všechna naměřená data, či jen data po použití některého datového filtru (např. jen data při vyšších otáčkách, než je určitá uživatelem zvolená hodnota). Dále zde lze definovat interval pro ukládání dat. Protože on-line vibrační diagnostika probíhá nepřetržitě, není možné (z důvodu obrovského množství dat) ukládat všechna data. Proto je zvolen interval 1 minuta a dále možnost „první“, software zpracuje první naměřenou hodnotu každou minutu (dalšími volbami je minimální a maximální hodnota naměřená za zvolený časový interval). Zajímavou možností je také „Filtr Spike“, který (pokud je aktivován) umožňuje ignorování nereálných hodnot (překračujících uživatelem zvolenou mez zadanou v jednotkách „g“).

Čtvrtou záložkou je „Monitorování“. Zde lze nastavit poplachové úrovně, viz kap. 3.4.4 Měření a vyhodnocování vibrací strojů. Problematikou nastavení poplachů a alarmů (provozních mezí vibrací) se tato práce zabývá v kapitole 7.3 Stanovení provozních mezí vibrací.

Pátou záložkou je „Adaptivní vydávání poplachu“. Pomocí nastavení pod touto položkou lze pro daný měřicí bod nastavit adaptivní poplachové úrovně. Poplachové úrovně se tak mohou měnit i v průběhu měření (např. dle otáček nebo procesní hodnoty, jako zatížení motoru). [26]

Šestou záložkou jsou „Volby displeje pro Observer“. Nastavení provedená pod touto záložkou nemají vztah k samotnému měření, ale ovlivní např. informace, které @plitude Observer zobrazí v popiscích grafů atd. Nastavit zde lze orientace měřicího bodu (horizontální, vertikální atd.) a směr otáčení měřeného rotačního zařízení.

Tímto způsobem byly vytvořeny a nastaveny všechny měřicí body z testovací databáze.

6 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ SYSTÉMU NA STROJI 1

V této kapitole jsou popsány výsledky měření provedených na stroji 1 (frézovací stroj DATRON M8Cube s vřetenem Weiss) za účelem testování měření hodnot vibrací a přenosu dat na server umístěný v budově A1 VUT FSI v září a říjnu 2018.

Bohužel předtím, než mohla data být zpracována, byl na server v budově FSI podniknut hackerský útok. Část dat nebyla zachráněna, a proto nemůže být prezentována.

Testování Systému ve firmě DATRON proběhlo ve 3 částech:

1. 20. září 2018 - Cílem byla instalace Systému do stroje DATRON M8Cube (stroje 1).
2. 18. října 2018 - Měření obsahovalo tyto 3 části:
 - měření vibrací strojního zařízení při provozu naprázdno (bez jakékoliv zátěže) za použití jednobřité frézy,
 - měření vibrací zařízení při provozu bez zátěže za použití dvoubřité frézy,
 - měření vibrací zařízení při obrábění zkušebního obrobku.
3. 19. října 2018 – Měření obsahovalo části:
 - měření vibrací strojního zařízení při provozu bez jakékoliv zátěže za použití jednobřité frézy při konstantních otáčkách,
 - měření vibrací strojního zařízení při provozu bez zátěže za postupného zvyšování otáček,
 - navíc se měření zaměřilo i na přenos dat z počítačové sítě ve firmě DATRON do serveru v budově A1 VUT FSI,

Při tomto testování byly použity nástroje, které byly domluvou zvoleny jako „referenční“. Jednobřítá fréza je typu 0068090K, dvoubřítá je potom typu 0068100, viz obr. 30. [18]

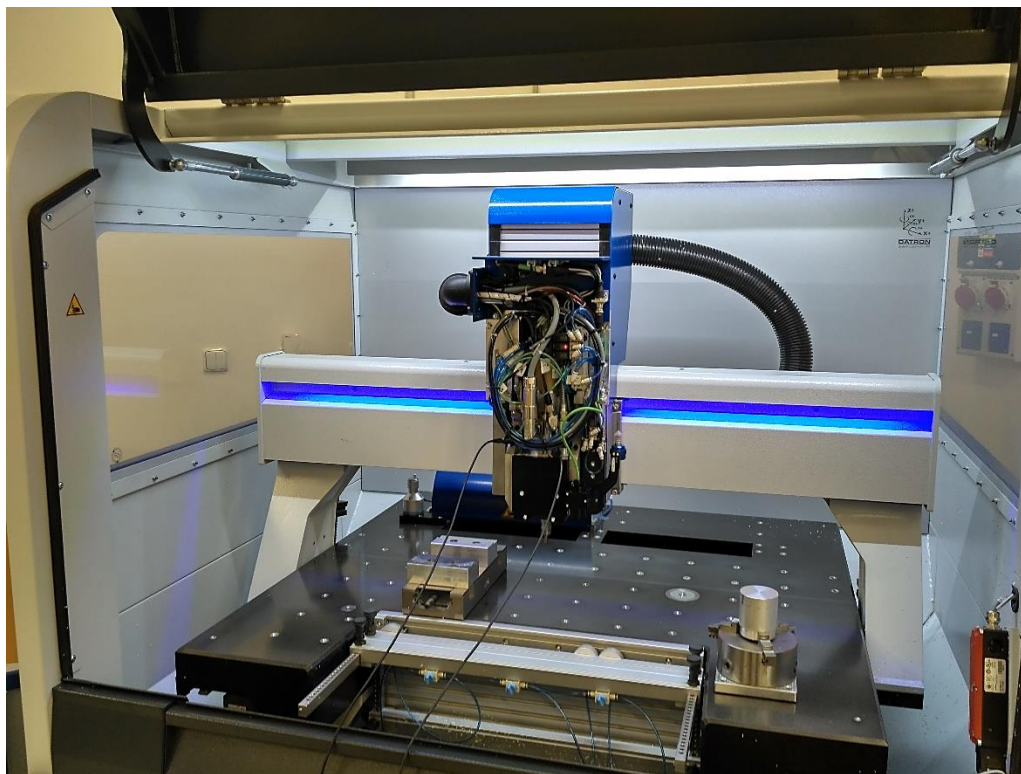


Obr. 30 – Referenční HSK frézy, vlevo jednobřítá, vpravo dvoubřítá, obě upevněné v nástrojové kleštině HSK [18]

Jak již bylo zmíněno, testování bez zátěže probíhalo dle dohody při 90 % z maximálních otáček – probíhalo tedy při 36 000 RPM. Výjimkou bylo jedno z testování z 19. října 2018, kdy se otáčky průběžně zvyšovaly z 10 000 RPM do 40 000 RPM (krok byl 1 000 RPM).

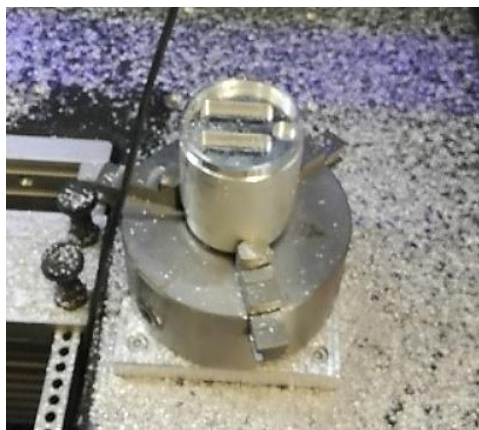
Pozice vřetene při testování bez zátěže (výchozí bod) byla rovněž zvolena dohodou. Vřeteno se uvede do M-nulového bodu (souřadnice $X = 0$ mm, $Y = 0$ mm, $Z = 0$ mm) a následně

je nastavena pozice v polovině os ($X = 500 \text{ mm}$, $Y = 350 \text{ mm}$, $Z = -150 \text{ mm}$), což je výchozí bod pro měření bez zátěže (viz obr. 31).



Obr. 31 – Pozice stroje pro vibrační měření při provozu bez zátěže

Zkušební obrobek, při jehož obrábění byly měřeny vibrace 18.10.2018, lze vidět na obr. 32.

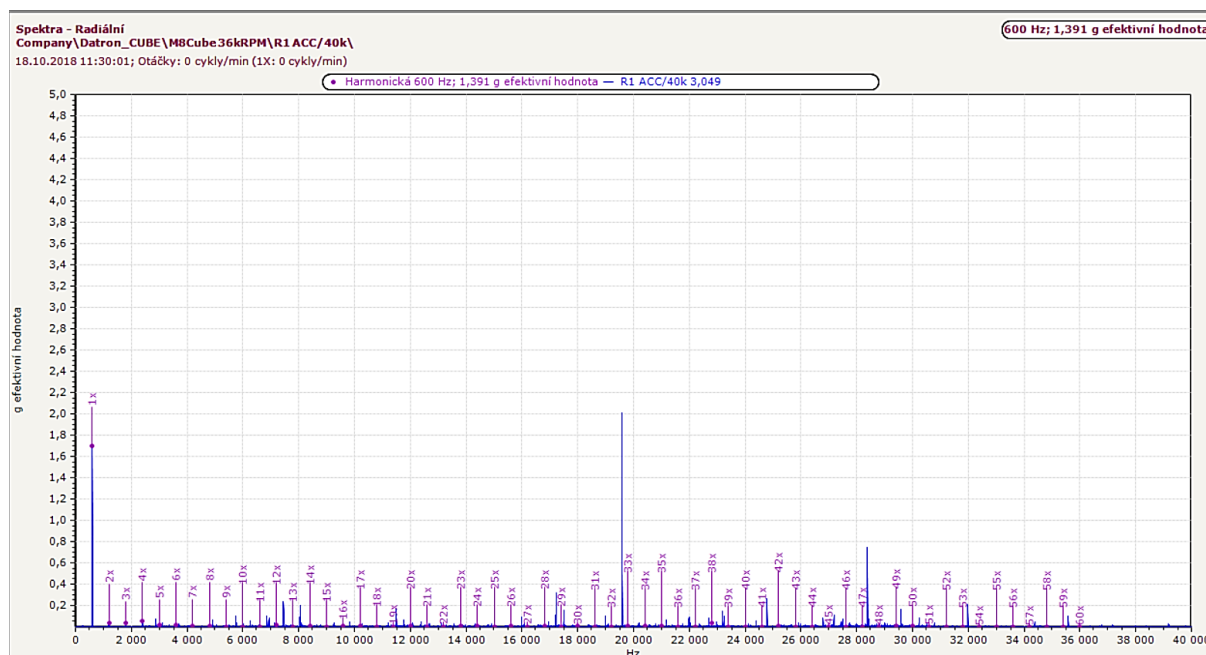


Obr. 32 - Zkušební obrobek

6.1 Zrychlení vibrací

Pro analýzu zrychlení vibrací byly v databázi vytvořeny pro každý ze snímačů 3 měřicí body, které se mezi sebou liší rozsahy analýzy (10 kHz, 20 kHz a 40 kHz). Dále je v databázi ještě desátý bod R1-R2 ACC/10k, který se od zbylých bodů odlišuje tím, že je dvoukanálový. Výhodou dvoukanálového bodu je to, že pomocí něj lze jednoduše porovnávat výsledky měření v obou radiálních měřicích směrech (R1 i R2).

Možností, jak vyhodnotit výsledky měření pomocí softwaru @ptitude Observer, je celá řada. Pro optimální výsledek je však potřeba možnosti kombinovat. Například je možné zobrazit si graf spektra (viz obr. 33). Na ose x tohoto typu grafu je frekvence, na ose y poté odpovídající celková hodnota vibrací (v tomto případě g – efektivní hodnota).



Obr. 33 – Graf spektra zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 11:30 pro měřicí bod R1 ACC/40k (radiální směr č. 1)

Jedná se o graf spektra zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 v čase 11:30 pro měřicí bod R1 ACC/40k, jedná se tedy o spektrum během provozu stroje naprázdno. Hodnoty zrychlení proto nejsou nijak vysoké. V grafu je označena otáčková frekvence 1X (600 Hz, tedy 36 000 RPM) a také její harmonické násobky (2X, 3X atd.).

Nevýhodou tohoto typu grafu je, že v něm lze vidět pouze jedno měření z mnoha (například při nastavení použitím pro účely této práce je graf spektra vytvářen každou minutu pro každý z měřicích bodů). Tento graf se hodí spíše pro možnosti detailnější analýzy vibrací, protože lze pomocí něj přesně vidět, na které frekvenci je velikost zrychlení vibrací v daném měřicím směru nejvyšší.

Vhodnější možností je proto kombinovat graf spektra s použitím grafu trendu. Ten zobrazuje pro každý čas měření nejvyšší naměřenou hodnotu vibrací. Na ose x je datum, kdy bylo dané měření provedeno, a na ose y je (stejně jako v předchozím případě) příslušná celková hodnota vibrací (zde g – efektivní hodnota). Díky tomu lze názorně vidět, ve kterých časech byly hodnoty zrychlení vibrací nejvyšší. @ptitude Observer navíc nabízí možnost „zobrazení spektra“, díky čemuž lze pomocí jednoho kliknutí pro zvolený čas zobrazit graf spektra.

Příklad grafu trendu je zobrazen na obr. 34. Konkrétně se jedná o graf trendu pro měření z 18. 10. 2018, měřicí bod R1 ACC/10k (tedy trend celkových hodnot zrychlení vibrací v pásmu do 10 000 Hz pro směr R1). Poplachové úrovně (žlutá a červená čára, tedy mez výstrahy a poplachová mez) ještě v té chvíli nebyly nastaveny pomocí žádné metodiky (ale expertním odhadem na 2,0 g a 5,0 g), proto jsou spíše informačního charakteru. Modré body slouží pro případné zobrazení spekter a viditelnost těchto bodů lze nastavit pomocí zaškrtnutí/odškrtnutí políčka „Spektra“ nahoře.



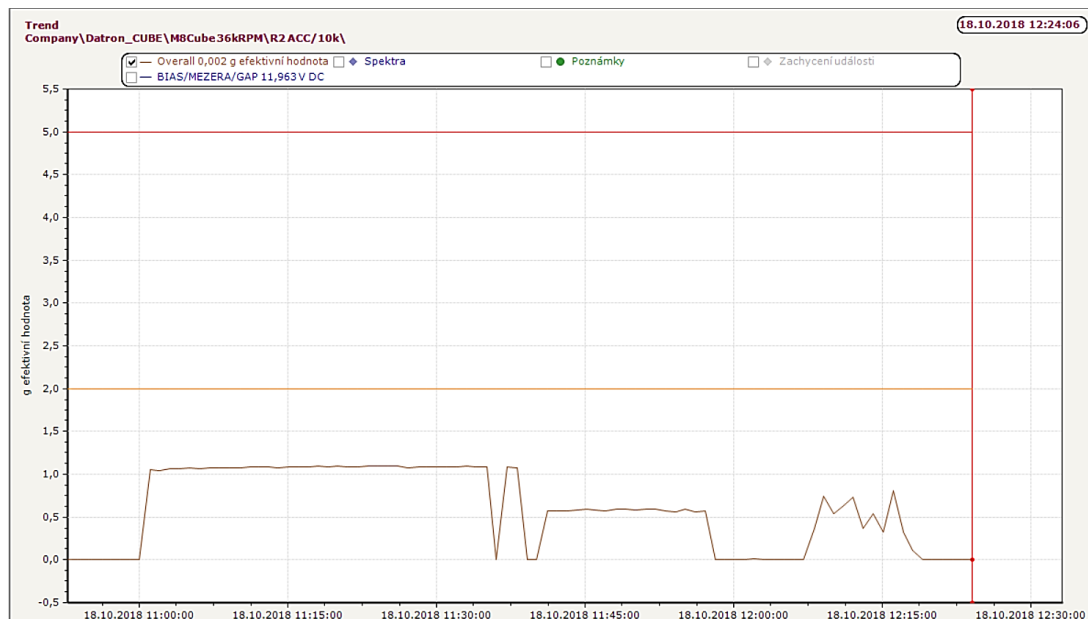
Obr. 34 – Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod R1 ACC/10k (radiální směr č. 1)

V tomto grafu lze vidět:

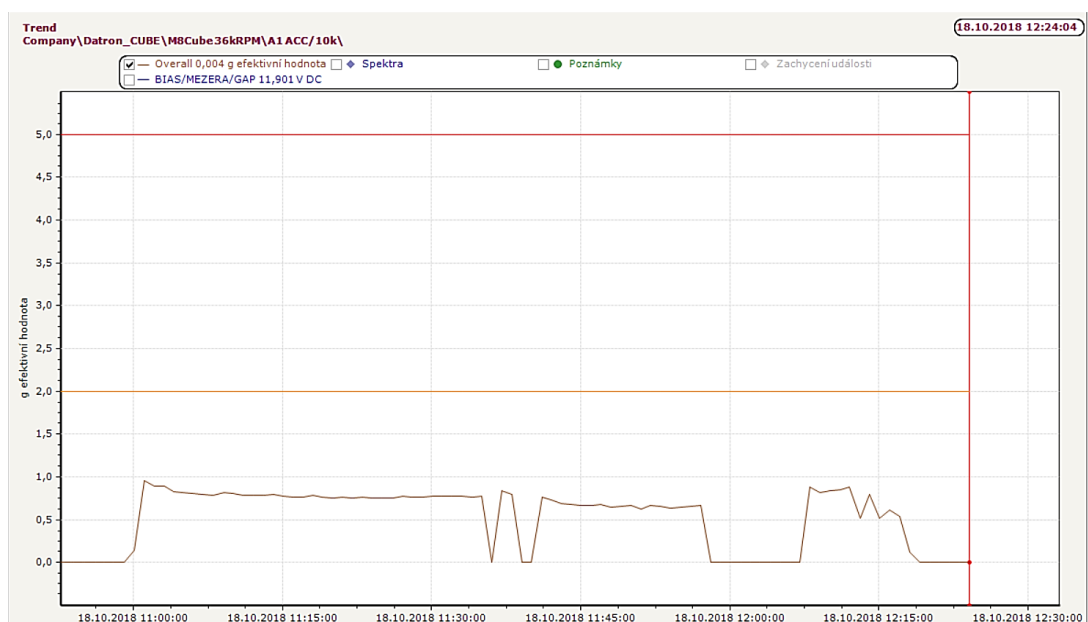
- Oblast 1 - celkové hodnoty zrychlení vibrací při provozu zařízení bez zátěže za použití jednobřité frézy. (Toto měření bylo na žádost společnosti DATRON krátce opakováno kvůli podezření, že přítomnost snímače jiného měřicího zařízení, který byl přichycen magnetem, mohla ovlivnit výsledky měření. Z grafů trendu lze vidět, že k žádnému významnému ovlivnění měření nedošlo.)
- Oblast 2 – celkové hodnoty zrychlení vibrací při provozu zařízení bez zátěže za použití dvoubřité frézy.
- Oblast 3 – celkové hodnoty zrychlení vibrací při obrábění zkušebního obrobku.

Pro srovnání jsou zobrazeny grafy trendu celkových hodnot zrychlení vibrací v radiálním směru č. 2, konkrétně měřicí bod R2 ACC/10k (viz obr. 35), a v axiálním směru, konkrétně měřicí bod A1 ACC/10k (viz obr. 36).

I v těchto grafech lze rozpoznat oblast 1, oblast 2 a oblast 3. Každá z nich zobrazuje příslušnou činnost strojního zařízení DATRON M8Cube, jak je popsáno výše.



Obr. 35 - Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod R2 ACC/10k (radiální směr č. 2)

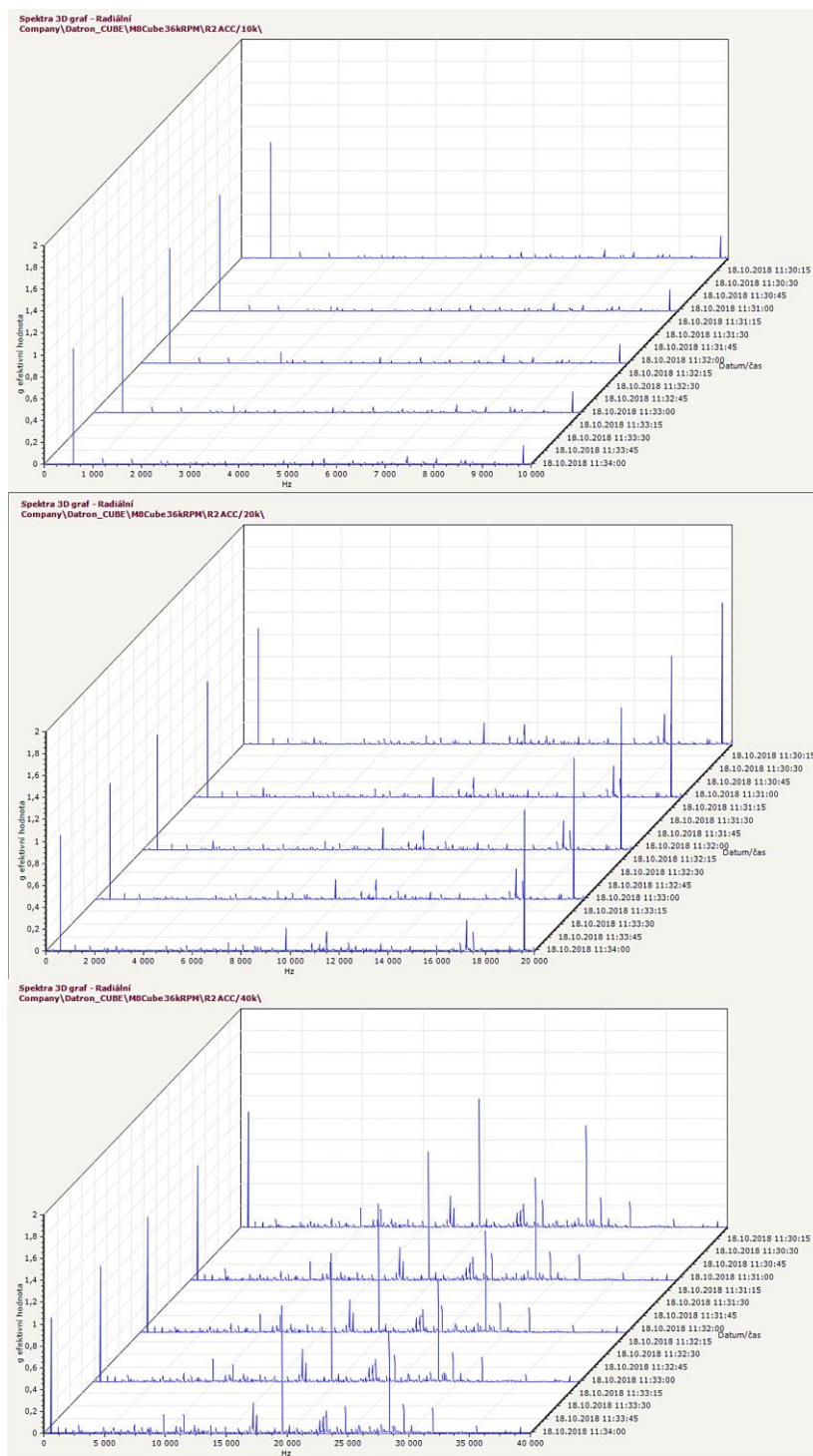


Obr. 36 - Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod A1 ACC/10k (axiální směr)

Na základě těchto grafů bylo možné konstatovat, že:

- Systém funguje správně, bez výpadků.
- Přenos dat na server je bezproblémový.
- Celkové hodnoty zrychlení vibrací jsou v obou radiálních směrech při použití jednobřitého nástroje vyšší než za použití dvoubřitého nástroje. V axiálním směru jsou hodnoty celkového zrychlení vibrací obdobné při použití obou typů nástrojů.

Jak již bylo zmíněno, databáze obsahuje pro analýzu měření každým snímačem více měřicích bodů, každý z nich s jiným frekvenčním rozsahem. Porovnání výsledků měření při různých měřicích rozsazích je zobrazeno na obr. 37.



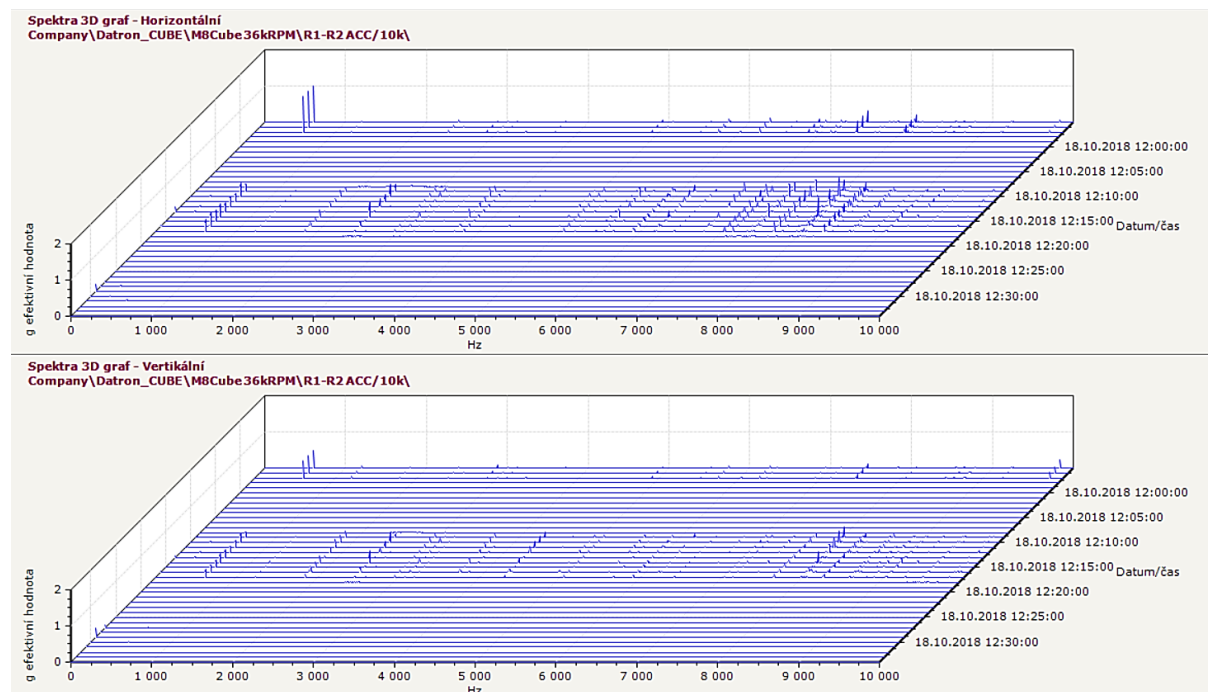
Obr. 37 – Srovnání spekter zrychlení měřených s různými rozsahy (měřicí body R2 ACC/10k, R2 ACC/20k a R2 ACC/40k)

Na obr. 37 jsou porovnány měřicí body R2 ACC/10k (nahore), R2 ACC/20k (uprostřed) a R2 ACC/40k. Výsledky jsou zobrazeny pomocí 3D grafu, který je další možností jak s využitím softwaru @ptitude Observer názorně porovnávat grafy frekvenčního spektra. Tento graf totiž zobrazí více grafů spektra za sebou (v tomto případě 5 grafů). Použita jsou data

z 18. 10. 2018, z měření v čase 11:30 až 11:35, tedy v čase, kdy probíhalo obrábění bez zátěže za použití jednobřité frézy.

Jak lze vidět, rozdílné rozsahy analýzy přináší podobné, avšak ne úplně totožné informace, proto má svůj význam provádět měření při několika různých rozsazích.

Na obr. 38 jsou zobrazeny výsledky analýzy pro měřicí bod R1-R2 ACC/10k. V těchto grafech jsou dobře viditelné rozdíly ve zrychlení vibrací v obou radiálních směrech. Konkrétně se jedná o naměřená data z 18. 10. 2018, v čase 12:00 až 12:35.

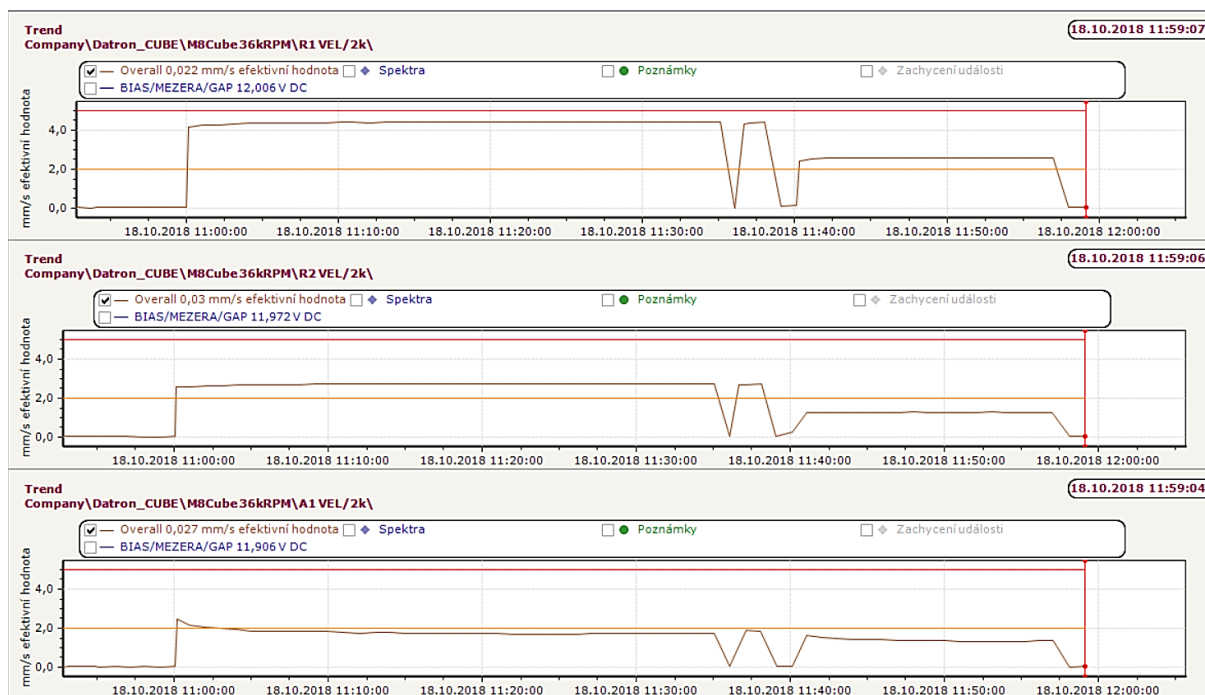


Obr. 38 – Výsledky měření zrychlení vibrací měřicím bodem R1-R2 ACC/10k

6.2 Rychlost vibrací

Rychlost vibrací byla měřena ve stejných situacích, ve kterých bylo měřeno i jejich zrychlení. Pro každý snímač byly v databázi vytvořeny dva měřicí body, lišící se (stejně jako u zrychlení) svými měřicími rozsahy – 2 000 Hz a 5 000 Hz.

Na obr. 39 jsou zobrazeny grafy trendu rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018 v čase 10:45 až 12:00 (zachyceny jsou na nich tedy hodnoty rychlosti vibrací při běhu bez zátěže s jednobřitým a následně i dvoubřitým nástrojem).



Obr. 39 – Trend hodnot rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018

Grafy na obr. 39 zachycují hodnoty z měřicích bodů R1 VEL/2K (nahore), R2 VEL/2K (uprostřed) a A1 VEL/2K (dole), tedy hodnoty rychlosti vibrací v obou radiálních směrech i v axiálním směru při měřicím rozsahu 2 000 Hz. K zobrazení je využita možnost programu @ptitude Observer označit si několik měřicích bodů naráz a následně zobrazit uživatelem zvolený typ grafu pro všechny označené měřicí body. Díky tomu lze jednoduše a přehledně porovnávat hodnoty z několika měřicích bodů najednou.

Jak lze vidět, hodnoty rychlosti vibrací byly v prvním radiálním směru (R1) přibližně dvojnásobné oproti hodnotám ve druhém radiálním směru (R2) a v axiálním směru (A1). Například hodnoty rychlosti v prvním radiálním směru (při běhu naprázdno za použití jednobřitého nástroje) se totiž pohybují nad 4 mm/s, zatímco v dalších měřicích směrech se tyto hodnoty pohybují přibližně kolem 2 mm/s.

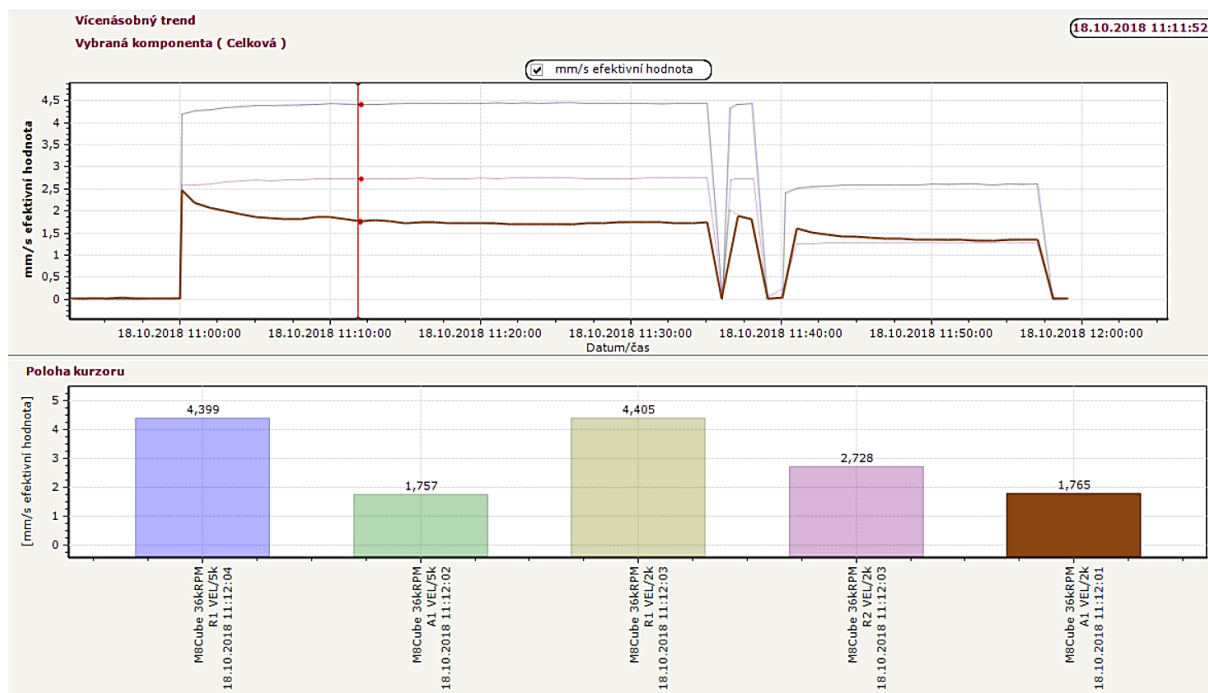
Stejně jako při měření zrychlení i zde jsou poplachové úrovně nastaveny pouze odhadem (mez výstrahy na 2 mm/s a poplachová mez na 5 mm/s), nelze proto vyvozovat žádné závěry z toho, že mez výstrahy byla překročena.

Dalším způsobem jak porovnávat více měřicích bodů mezi sebou je možnost „ Vícenásobný trend“. Tato možnost zobrazí v jednom grafu data naměřená všemi označenými měřicími body (rozlišené barevně). Pod tímto grafem ještě navíc ve druhém (sloupcovém) grafu zobrazí naměřené hodnoty z času, který je v prvním grafu označen. To je ilustrováno na obr. 40.

První graf zobrazuje hodnoty rychlosti vibrací z 18. 10. 2018 v časech 10:45 až 12:00 (opět se tedy jedná o hodnoty naměřené při provozu bez zátěže za použití jednobřitého nástroje a následně dvoubřitého nástroje). Druhý graf zobrazuje konkrétní hodnoty rychlosti vibrací v čase 11:11 (tento čas je zvolen kurzorem v prvním grafu) pro příslušné měřicí body.

Legenda k obr. 40:

- Modrou barvou jsou označena data z měřicího bodu R1 VEL/5K,
- zelenou barvou data z měřicího bodu A1 VEL/5K,
- žlutou barvou bod R1 VEL/2K,
- fialovou barvou měřicí bod R2 VEL/2K,
- hnědou barvou bod A1 VEL/2K.

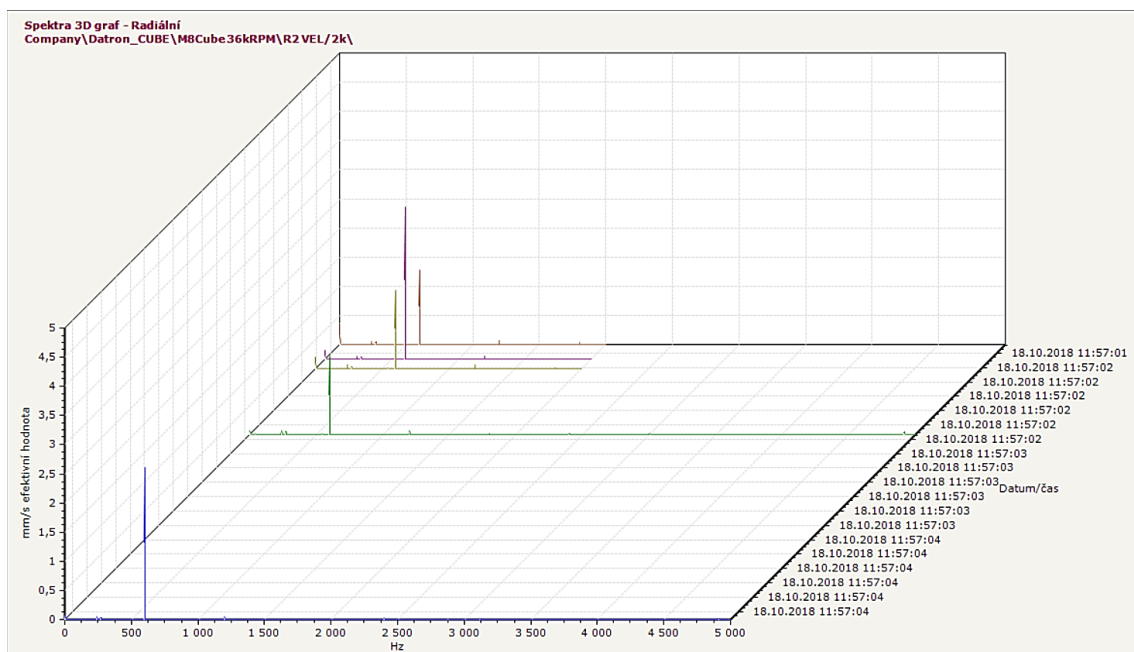


Obr. 40 – Vícenásobný trend hodnot rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018

Z grafů na obr. 40 lze vidět, že hodnoty naměřené radiálním snímačem č. 1 (za různých měřicích rozsahů) se od sebe liší až v tisících mm/s a to stejné platí pro hodnoty naměřené axiálním snímačem. Dá se předpokládat, že pro hodnoty naměřené radiálním snímačem č.2 bude platit totéž. Na druhou stranu při porovnání hodnot z různých snímačů jsou vidět podobné výsledky jako při předchozím porovnání (několik grafů trendu). Tedy, že hodnoty rychlosti vibrací v prvním radiálním směru jsou asi dvojnásobné oproti hodnotám vibrací ve zbylých dvou směrech.

Na obr. 41 je zobrazeno frekvenční spektrum rychlosti vibrací z 18. 10. 2018 v čase 11:57 (jedná se o provoz zařízení bez zátěže za použití dvoubřitého nástroje při rychlosti otáček 36 000 RPM) pro stejných 5 měřicích bodů, které byly použity i v předchozím grafu (viz legenda k obr. 40).

Dle tohoto grafu lze konstatovat, že nejvýraznější amplitudy rychlosti vibrací se vyskytují na otáčkové frekvenci diagnostikovaného strojního zařízení (600 Hz).



Obr. 41 – Frekvenční spektra rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018 v čase 11:57 pro různé měřicí body

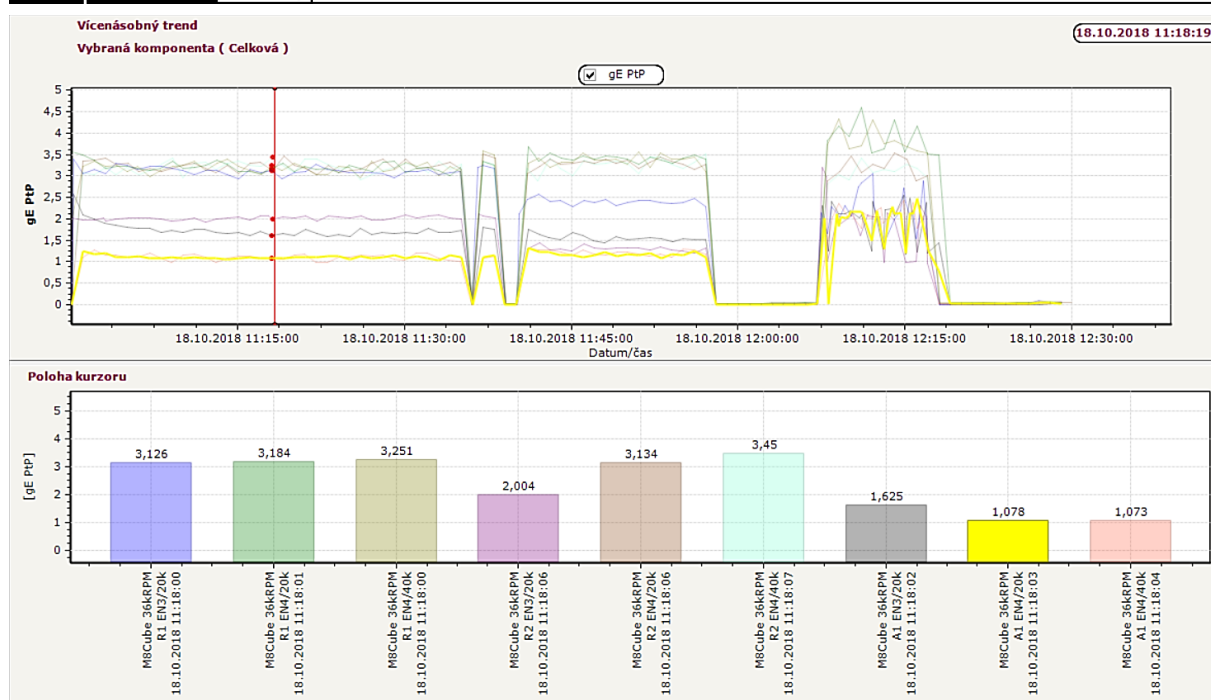
6.3 Obálka zrychlení vibrací

Obálka zrychlení vibrací byla měřena ve stejných provozních situacích, jako zrychlení vibrací a rychlost vibrací. Pro každý snímač byly v databázi vytvořeny 3 měřicí body. První z nich byl pro obálku zrychlení III (posuzovaná oblast tedy byla 500 Hz až 10 kHz), přičemž měřicí rozsah byl zvolen na 20 000 Hz. Druhé dva jsou pro obálku zrychlení IV (posuzovaná oblast 5 kHz až 40 kHz), přičemž měřicí rozsahy byly 20 kHz a 40 kHz. Toto vychází z tab. 2 uvedené v podkapitole 5.3.4 Testovací databáze.

Na obr. 42 jsou zobrazeny naměřené hodnoty obálky zrychlení ve všech 3 měřicích směrech pro všechny 3 měřicí body. Modrá barva označuje hodnoty z měřicího bodu R1 EN3/20k, tmavě zelená měřicí bod R1 EN4/20k, světle hnědá měřicí bod R1 EN4/40k, fialová měřicí bod R2 EN3/20k, tmavě hnědá R2 EN4/20k, světle zelená R2 EN4/40k, šedá A1 EN3/20k, žlutá A1 EN4/20k a růžová A1 EN4/40k.

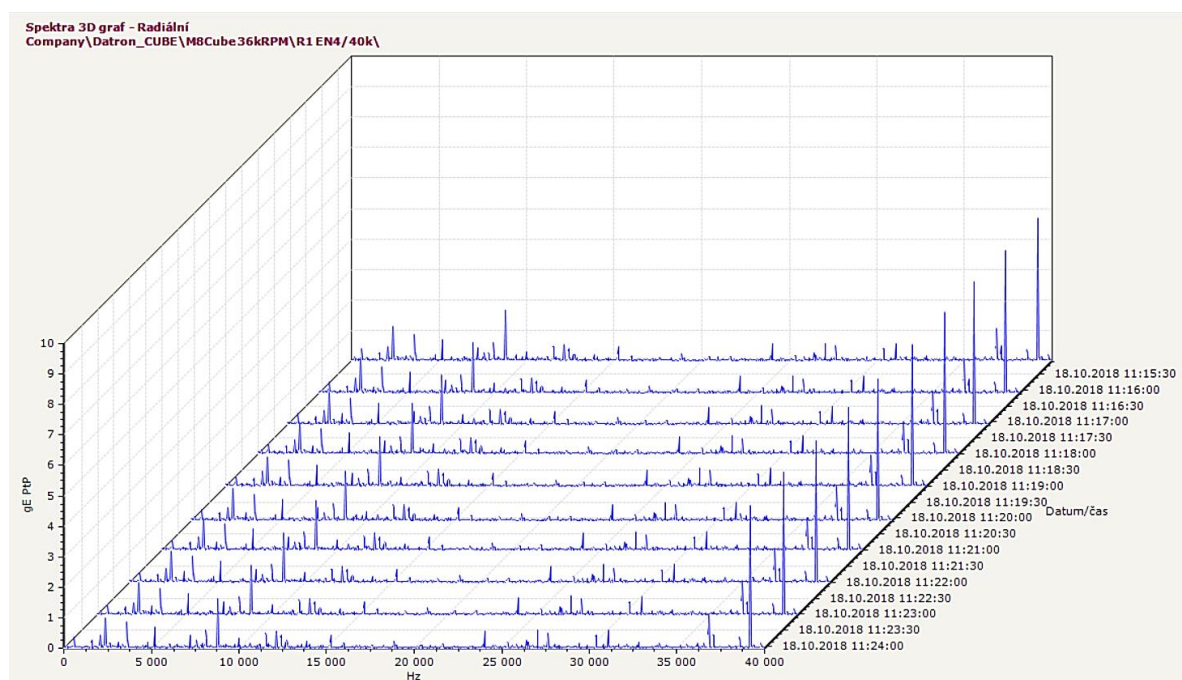
Jedná se o hodnoty naměřené dne 18. 10. 2018 v časovém rozmezí 11:00 až 12:30. Graf tedy zobrazuje hodnoty naměřené při běhu zařízení bez zátěže za použití jednobřité frézy, hodnoty naměřené při běhu zařízení bez zátěže za použití dvoubřité frézy i hodnoty naměřené při obrábění zkušebního obrobku.

Spodní (sloupcový) graf na obr. 42 zobrazuje konkrétní hodnoty naměřené v čase 11:18. Lze vidět, že hodnoty obálky zrychlení dosahují v radiálních směrech vyšších hodnot než v axiálním směru.



Obr. 42 – Graf vícenásobného trendu pro hodnoty obálky zrychlení ve všech měřicích směrech

Pro lepší možnosti analýzy je vhodné k analýze trendu celkových hodnot obálky zrychlení přidat i analýzu jejích spekter. Pak je totiž možné zvolit vhodnou oblast pro detailnější analýzu. Frekvenční spektrum obálky zrychlení v radiálním směru č. 1 ze dne 18. 10. 2018 v časech 11:15 až 11:25 je proto zobrazeno na obr. 43. Pro tuto ilustraci byla zvolena obálka IV s rozsahem analýzy do 40 kHz (měřicí bod R1 EN4/40k).



Obr. 43 – Frekvenční spektrum obálky zrychlení IV v radiálním směru č. 1 ze dne 18. 10. 2018

Naměřené hodnoty poukázaly na dobrý stav stroje 1. Zatěžování tohoto stroje se dle naměřených hodnot pohybuje v dovolených mezích. Výsledky testování rovněž ukázaly, že experiment byl úspěšný: přenos dat fungoval a měření probíhalo v pořádku.

Po úspěšném testování na lépe dostupném stroji (stroji 1) již bylo možné Systém aplikovat i v další (zvolené testovací) firmě na stroji 2.

7 ZAVEDENÍ ONLINE VIBRODIAGNOSTIKY NA STROJI 2

Tato kapitola se zaměřuje na samotnou online vibrační diagnostiku aplikovanou dle domluvy s vedením firmy DATRON ve zvolené testovací firmě na konkrétním zvoleném zařízení (stroj 2 – frézovací zařízení M8Cube s vřetenem Jäger). Do tohoto zařízení byl nainstalován Systém (jehož funkčnost byla ověřena během jeho aplikace na stroji 1 – viz kapitoly 5 a 6).

Za testovací firmu (ve které byl systém online vibrační diagnostiky dle pokynů vedení firmy DATRON zaveden) byla zvolena společnost EMKO Case, a.s. sídlící v Brně (dále jen EMKO). Do zvoleného strojního zařízení v této firmě byly nainstalovány snímače a ty byly následně zapojeny do on-line systému SKF Multilog IMx-8, který byl poté zapojen do internetové sítě a propojen se serverem na VUT v Brně. K vyhodnocování výsledků byl opět použit software @ptitude Observer.

Diagnostikované strojní zařízení (stroj 2) je obdobného typu jako to, na kterém byla testována funkčnost Systému. Vyrobeno bylo v září roku 2014 a v době instalace Systému byl v provozu již 5247 hodin. Jedná se tedy o starší stroj, než je stroj 1 s vřetenem Weiss (ten je z roku 2018). [30]

V době instalace Systému již bylo používáno druhé vřeteno, protože u původního vřetene bylo poškozeno uložení (jedno ložisko bylo úplně zničeno a další ložisko bylo poškozeno). Nové vřeteno je 2 kW vřeteno Jäger (viz kapitola 4), jeho výrobní číslo je SN 32450 a v době instalace mělo odpracováno 256 hodin.

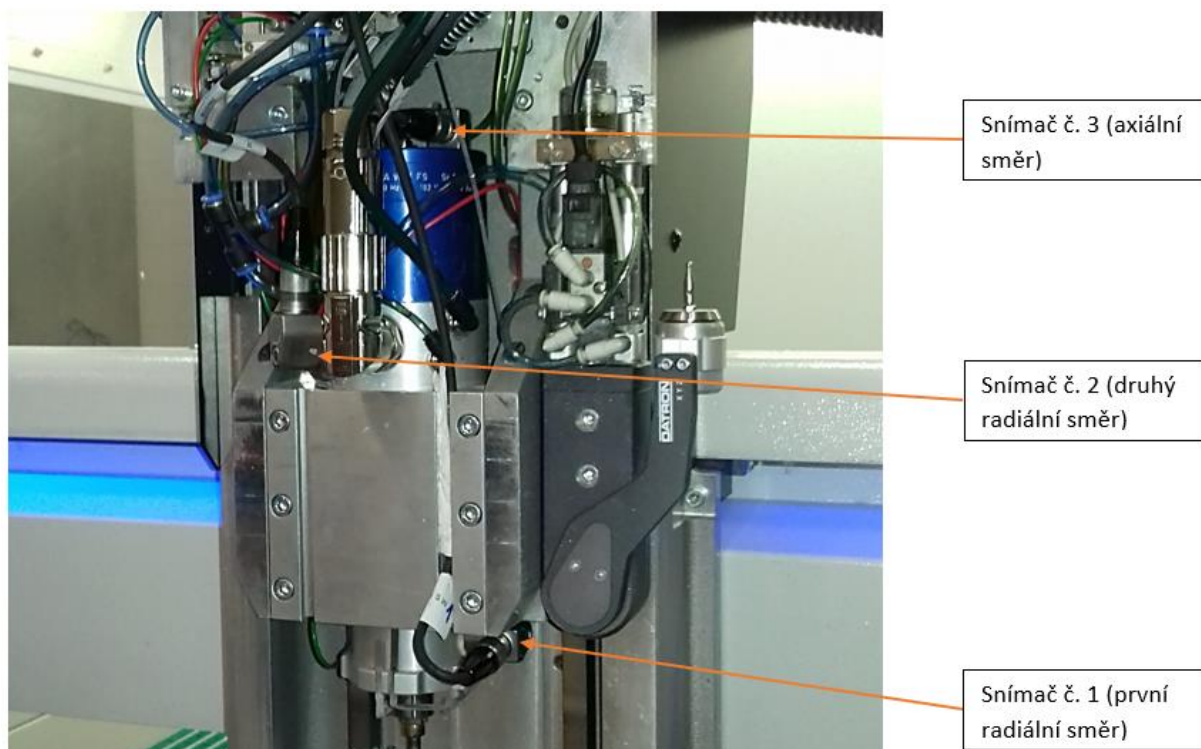
Připojení k databázovému serveru, umístěnému v budově A1 VUT/FSI, je na stejném principu jako při testování Systému ve firmě DATRON.

7.1 Upevnění snímačů

Použité akcelerometry byly popsány v kapitole 5.3.1 Hlavní komponenty Systému. Tyto snímače byly upevněny na co nejvhodnější místa (v souladu s doporučeními v normě ČSN ISO 20816-1).

Stejně jako u připevňování snímačů na stroj 1 ve firmě DATRON, i ve firmě EMKO byly dva radiální snímače (R1 a R2) upevněny lepidlem HBM X60 (pomocí lepidla HBM X60 byly přilepeny kovové podložky se závitem a na ně byly pomocí šroubu přišroubovány samotné akcelerometry). Snímač A1 byl (z důvodu velice omezeného prostoru) přichycen přímo nalepením na zvolené místo. Před samotným uchycením snímačů byla zvolená místa nejdříve odmaštěna prostředkem čističe povrchů RMS 1 (v zájmu co nejmenšího ovlivnění naměřených hodnot).

Již připevněné snímače jsou zachyceny na obr. 44.



Obr. 44 – Pohled na přilepené snímače zrychlení R1, R2, A1

Snímač vpravo dole je snímač zrychlení radiálních vibrací R1 (detail je na obr. 45). Snímač vlevo je snímač zrychlení radiálních vibrací R2 (detail je na obr. 46). Snímač nahore uprostřed je pak snímač zrychlení axiálních vibrací A1 (detail je na obr. 47).



Obr. 45 – Detail snímače R1



Obr. 46 – Detail snímače R2



Obr. 47 – Detail snímače A1

Jak lze vidět na obr. 44 a obr. 45, u snímače R1 je kabel vložen do montážní drážky a v té je zafixován pomocí izolační pásky. Důvodem je ochrana tohoto kabelu (vlivem vibrací stroje při obrábění by totiž mohlo dojít k jeho poškození).

7.2 Měřicí databáze

Měřicí databáze pro stroj 2 (viz obr. 48) byla oproti testovací databázi použité při testování funkčnosti Systému na stroji 1 mírně pozměněna. Základní části však zůstaly zachovány. Použité metody a rozsahy měření korespondují s těmi uvedenými v tab. 1 (podkapitola 5.3.4 Testovací databáze). Změněno bylo pouze to, že u měřicích bodů zrychlení (ACC 10k, ACC 20k a ACC 40k) je použita detekce špička-špička místo efektivní hodnoty.

Měřicí body R1 a R2 byly spojeny do dvoukanálových měřicích bodů R1/R2, aby bylo jednodušší porovnávat mezi sebou naměřené hodnoty v radiálních směrech. Ukázalo se však, že pro maximální efektivitu by snímače R1 a R2 musely být umístěny na stejném místě vřetene vzdálené o 90°. Takovéto umístění senzorů ale nebylo možné provést z důvodu nedostatku volného místa na vřetenu (viz podkapitola 7.1 Upevnění snímačů).

Navíc byla do databáze přidána složka typu „Skupina zachycených událostí“ označená „EMKO_Events“. V této složce jsou 3 měřicí body (R1_Event, R2_Event a Ax_Event, tedy každý pro jeden snímač) a zobrazit zde lze tzv. zachycené události. To jsou události, které jsou nějakým způsobem významné, a proto jsou zde uložena data z určitého času před (pre-data) a po události (post-data). V databázi je nastaveno zachycení dat od 1,28 s před událostí až po 5,12 s po události. Tato data se odlišují oproti ostatním tím, že nejsou zachytávána jednou za minutu, ale kontinuálně po zvolenou dobu. Během zachytávání události všechny ostatní sběry dat pokračují dle nastaveného systému v databázi.

Při vytváření měřicího bodu pro zachycování události je třeba dbát na „Faktor trvání“. Ten závisí na zvoleném počtu vzorků (pro vysokootáčkové stroje je vhodná možnost 8192 vzorků) a na frekvenčním rozsahu. „Faktor trvání“ musí mít větší hodnotu než 0,16 sekundy. V tomto případě má hodnotu 0,32 s, což je vyhovující. Hodnota „Faktoru trvání“ dle konkrétního zvoleného frekvenčního rozsahu a počtu vzorků je vidět v tab. 3. Zakázané hodnoty „Faktoru trvání“ jsou v této tabulce zvýrazněny červeně. [30]

Tab. 3 – Hodnoty „Faktoru trvání“ v závislosti na zvoleném frekvenčním rozsahu a počtu vzorků [30]

Frekvenční rozsah	Vzorkovací rychlost	Počet vzorků			
		1024	2048	8192	16384
0 - 1000 Hz	2560	0,4 s	0,8 s	3,2 s	6,4 s
0 - 2000 Hz	5120	0,2 s	0,4 s	1,6 s	3,2 s
0 - 5000 Hz	12800	0,08 s	0,16 s	0,64 s	1,28 s
0 - 10000 Hz	256000	0,04 s	0,08 s	0,32 s	0,64 s

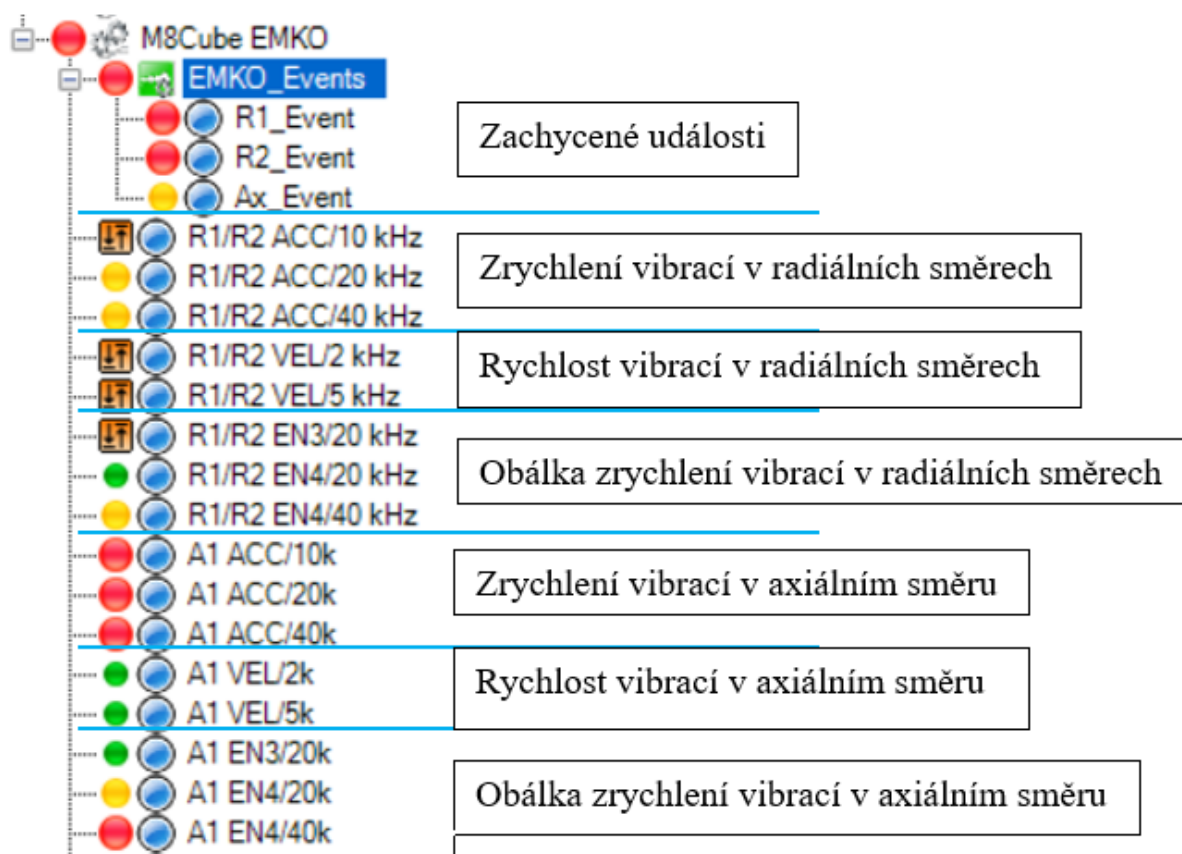
Při nastavování zachycování událostí je nutné dodržet tato pravidla: [30]

- Hodnota „Faktoru trvání“ je minimálně 0,16 s.
- Vyrovnávací paměť pro „před událostí“ (pre-data) má hodnotu minimálně o velikosti 1x „Faktor trvání“.
- Vyrovnávací paměť pro čas „po události“ (post-event) má hodnotu minimálně 2x „Faktor trvání“. Navíc musí tento čas být minimálně 5 sekund.

Zachycení události programem @ptitude Observer lze provést buď manuálně (pomocí tlačítka Zachytit událost) nebo automaticky (událost je zachycena, pokud nastal poplach).

Hlavním přínosem zachycování událostí je automatické zaznamenávání havarijních stavů diagnostikovaného zařízení. Je totiž důležité počítat s tím, že i jediný náraz frézy do obrobku či jiného předmětu může iniciovat nevratné poškození vřetene či ložiska. [30]

Nastavení měřicích bodů v databázi pro online vibrační diagnostiku stroje 2 je (kromě výše zmíněného) obdobné jako u databáze pro stroj 1. Měřicí databáze pro diagnostiku stroje DATRON M8Cube ve firmě EMKO (stroje 2) je zobrazena na obr. 48.



Obr. 48 – Databáze pro diagnostiku stroje 2

7.3 Stanovení provozních mezí vibrací

Aby měla dlouhodobá analýza trendu vibrací vypovídající hodnotu, je nutné pro jednotlivé měřicí body stanovit provozní meze vibrací (viz podkapitola 3.4.4 Měření a vyhodnocování vibrací strojů).

V první části této podkapitoly jsou srovnány hodnoty vibrací při několika různých výrobních operacích (což je důkazem náročnosti stanovení hodnoty provozních mezí, protože nelze předem říci, jaké hodnoty budou naměřeny a jestli jsou tyto hodnoty ještě v pořádku, nebo již diagnostikovanému stroji hrozí poškození). Ve druhé části je samotné určení hodnot provozních mezí.

Prvním problémem, který se vyskytl, byla již samotná terminologie. Používaný software @ptitude Observer 10.5.0 totiž jednotlivé úrovně označuje jinak, než jak je označují mezinárodní normy. Dokonce i samotné normy ISO ale nejsou v tomto označování jednotné. Toto je demonstrováno v tabulce 4. Aby bylo předcházeno nedorozumění, jsou pro účely této práce ponechány termíny používané softwarem. [30]

Tab. 4 – Terminologie pro provozní meze vibrací [30]

<i>ČSN ISO 13372:2013 Monitorování stavu a diagnostika strojů - Slovník</i>	<i>ČSN ISO 20816-1:2017 Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: všeobecné pokyny</i>	<i>Software SKF @ptitude Observer 10.5.0</i>
<i>poplach (alarm)</i>	<i>výstraha (alarm)</i>	<i>úroveň varování (warning level)</i>
<i>výstraha (alert)</i>	<i>přerušení provozu (trip)</i>	<i>poplachová úroveň (alarm level)</i>

Samotné stanovení hodnot provozních mezí vibrací je komplexní záležitostí, protože jak již bylo zmíněno, jsou hodnoty těchto mezí stanovovány buď na základě zkušeností, nebo dohody.

Problémem je, že ve firmě EMKO je stroj 2 používán pro celou řadu operací. Při každé z těchto operací stroj vykazuje rozdílnou hodnotu velikosti vibrací a navíc mohou být naměřené hodnoty ovlivněny i externími vlivy (např. jiné stroje mohou otřásat plošinou, na které je stroj uložen, a tím uměle zvyšovat hodnoty, které jsou snímači naměřeny, nebo také mohou být zvýšeny vlivem elektrického šumu).

7.3.1 Srovnání hodnot vibrací při různých výrobních operacích

Rozdílné hodnoty vibrací při různých výrobních operacích lze demonstrovat například na několika měření z ledna 2019.

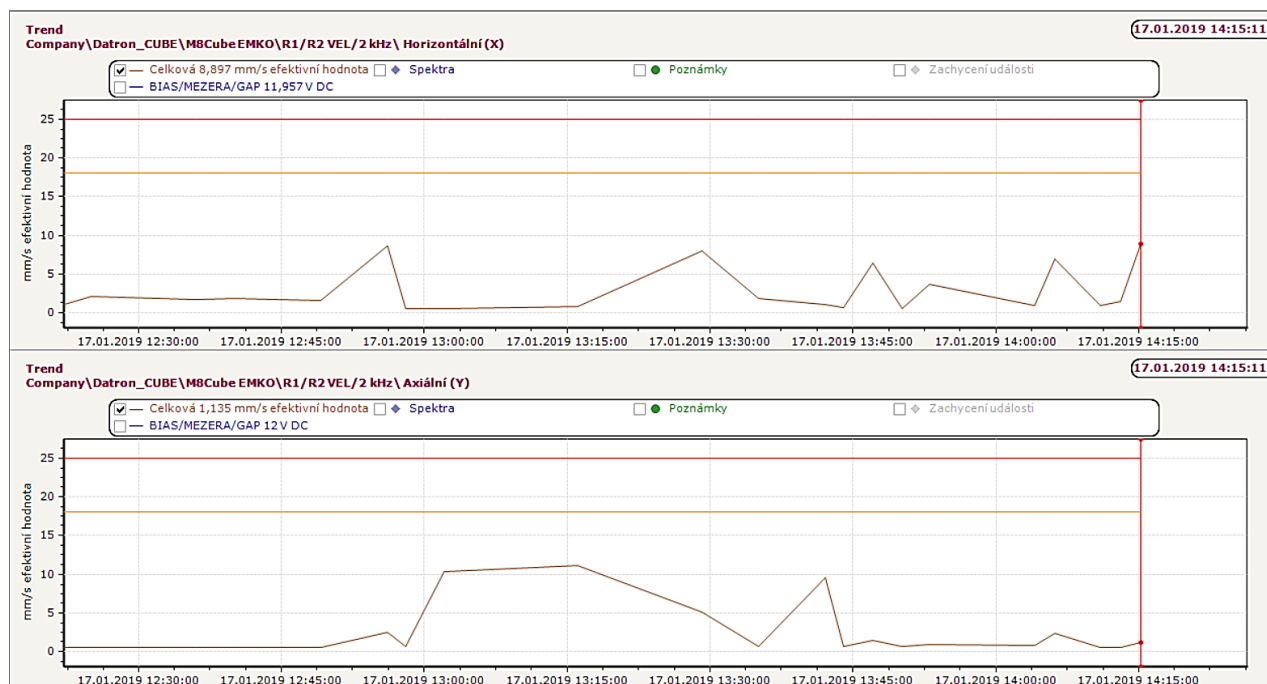
Operace „Přední čelo Raspberry“

První z nich je ze 17. 1. 2019 v čase od 12:20 do 14:15. V tuto dobu probíhala operace „Přední čelo Raspberry“, při níž byl frézován výrobek viz obr. 49.



Obr. 49 – Výrobek operace „Přední čelo Raspberry“

Grafy trendu rychlosti vibrací (pro měřicí bod R1/R2 VEL/2 kHz) při této výrobní operaci jsou zobrazeny na obr. 50. Horní graf zobrazuje data z prvního radiálního směru (R1), spodní graf zobrazuje data z druhého radiálního směru (R2).



Obr. 50 – Rychlost vibrací při frézování výrobku „Přední čelo Raspberry“

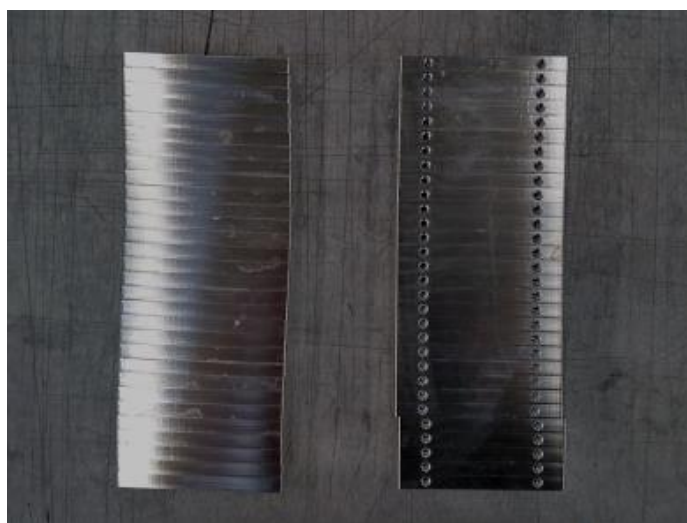
V této výrobní operaci je vyráběno 70 shodných kusů. Každá část operace je provedena 70x, načež se přejde na další část, která je provedena rovněž 70x atd. Dohromady se operace skládá ze 4 částí. V první z nich je vyfrézována podélná rýha přes celý polotovar (70 podélných rýh je frézováno asi 30 minut – od 12:24 do 12:54) nástrojem o průměru 6 mm při úběru materiálu 1 mm při 36 000 RPM. Ve druhé části jsou do podélné rýhy vyfrézovány 3 obdélníkové otvory (použit je rovněž nástroj o průměru 6 mm, rychlost otáček je 36 000 otáček za minutu, délka této části operace je 1 hodina). Ve třetí části je provedeno zaoblení krajů třetího otvoru (na obr. 49 je nejvíce vpravo, použit je nástroj o průměru 1,5 mm, rychlost otáček 54 000 RPM). Ve čtvrté a poslední části je provedeno vykrojení obvodu celého výrobku pomocí

nástroje s průměrem 3 mm za rychlosti otáček 40 000 RPM. Na začátku každé z částí operace je nejdříve provedena výměna nástroje.

Z grafu trendu vibrací na obr. 50 je vidět, že maximální rychlost vibrací naměřená v prvním radiálním směru (graf nahoře) je 8,897 mm/s a této rychlosti bylo dosaženo během čtvrté části operace. Ve druhém radiálním směru (graf dole) ale vibrace dosahovaly nejvyšších hodnot spíše během druhé části operace. Maximální rychlost vibrací je zde 11,12 mm/s.

Operace „Raspberry-B“

Další z výrobních operací je „Raspberry-B“ z 29. 1. 2019. Tato operace byla zaměřena z důvodu podezření firmy, že právě při této operaci dochází k extrémním hodnotám vibrací z důvodu velkého úběru materiálu při některých částech operace. Výrobek frézovaný při této operaci je zobrazen na obr. 51.



Obr. 51 - Výrobek operace „Raspberry-B“

Při této operaci je vedle sebe položeno 30 destiček (viz obr. 51 vlevo). Následně jsou do každého kusu vyfrézovány 2 díry (dohromady tedy 60 děr). Operace se skládá ze 3 dílčích částí. V první části operace jsou vyvrtány 2 díry do každého kusu za pomoci nástroje s průměrem 1 mm a rychlosti otáček 30 000 otáček za minutu (trvání této části operace je asi 3 minuty). Ve druhé části jsou tyto díry zahlubeny pomocí nástroje s průměrem 0,2 mm opět při 30 000 otáčkách za minutu (tato část operace trvá asi 2 minuty). V poslední části operace je do těchto děr vyřezán závit pomocí nástroje s průměrem 2 mm při 20 000 otáčkách za minutu. Tato část operace trvá asi 5 minut.

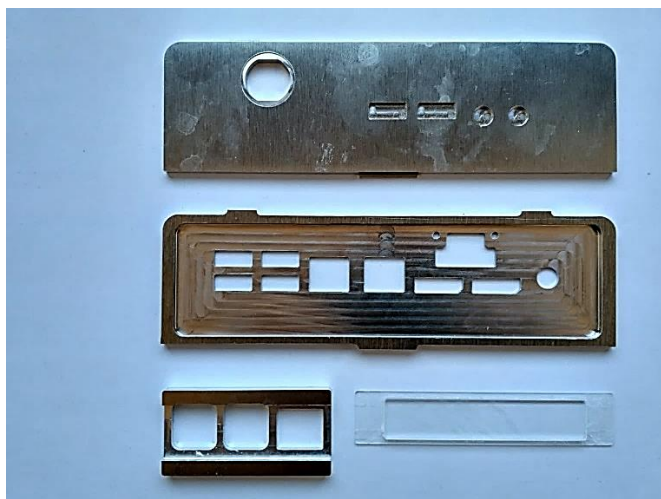
Na obr. 52 je znázorněn graf trendu rychlosti vibrací při této výrobní operaci, kvůli srovnání opět z měřicího bodu R1/R2 VEL/2 kHz.



Obr. 52 - Rychlost vibrací při frézování výrobku „Raspberry-B“

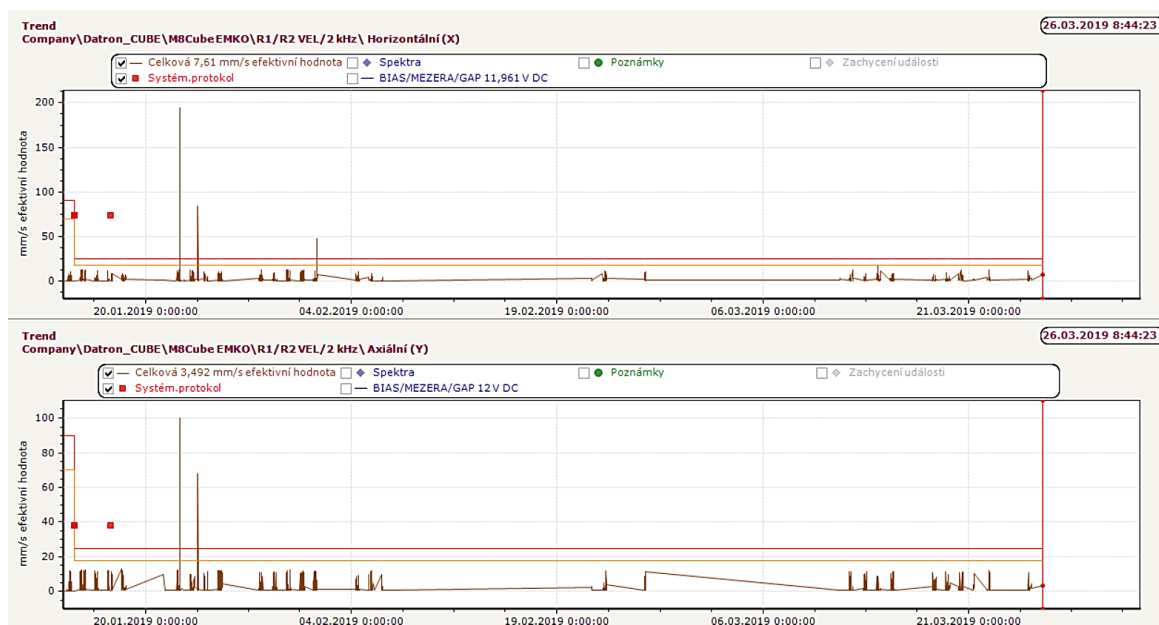
Z grafů na obr. 52 lze vidět, že původní hypotéza (hodnoty vibrací budou nadprůměrné) se nepotvrdila. Naopak, rychlost vibrací je mnohem menší než při předchozí uvedené operaci, v prvním radiálním směru (graf nahoře) jsou maximální hodnoty 3,263 mm/s (v případě „Přední čelo Raspberry“ to bylo 8,897 mm/s) a ve druhém radiálním směru (graf dole) 7,23 mm/s (v předchozím případě to bylo 11,12 mm/s).

Obdobně kolísají i hodnoty u všech dalších výrobních operací. Správná volba hodnoty provozních mezí pro jednotlivé měřicí body je opravdu náročným problémem, protože výrobních operací, ke kterým je stroj 2 využíván, je velké množství. Pro ilustraci je na obr. 53 zachyceno (kromě „Přední čelo Raspberry“) několik dalších výrobků frézovaných na diagnostikovaném strojním zařízení.



Obr. 53 – Příklady výrobků frézovaných pomocí stroje 2

Kolísání hodnot vibrací při různých operacích je dobře viditelné i z grafu na obr. 54, který zobrazuje trend rychlosti vibrací (opět kvůli srovnání je použit měřicí bod R1/R2 VEL/2 kHz) z delšího časového období - 14. 1. 2019 až 26. 3. 2019.



Obr. 54 – Trend rychlosti vibrací

Horní graf zobrazuje hodnoty z prvního radiálního směru (R1), dolní graf pak zobrazuje hodnoty z druhého radiálního směru (R2). Jak lze vidět, maximální hodnoty rychlosti vibrací během tohoto časového období se pohybují kolem 11 mm/s u snímače R1 i u snímače R2. Naměřeny byly ojediněle i několikanásobně vyšší hodnoty (např. 194,5 mm/s).

7.3.2 Metoda 30MAX.

Diagnostikované zařízení dosahuje při každém výrobním programu jiných hodnot vibrací. Proto pro stanovení a zdůvodnění hodnot provozních mezí vibrací musela být použita speciální metoda. Dle doporučení pana doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. byla navržena statistická metoda využívající výsledky analýzy třiceti extrémních hodnot vibrací (dále jen 30MAX). [29]

Nejdříve byla vyexportována data z programu @ptitude Observer. Následně byla vyexportovaná data pomocí softwaru Excel uspořádána a bylo vybráno 30 nejvyšších hodnot pro každý měřicí bod (pro dvoukanálové měřicí body byl každý z kanálů vyhodnocen zvlášť). Výpočty byly provedeny pro data získaná od 10. 1. 2019 (instalace snímačů) do 26. 3. 2019.

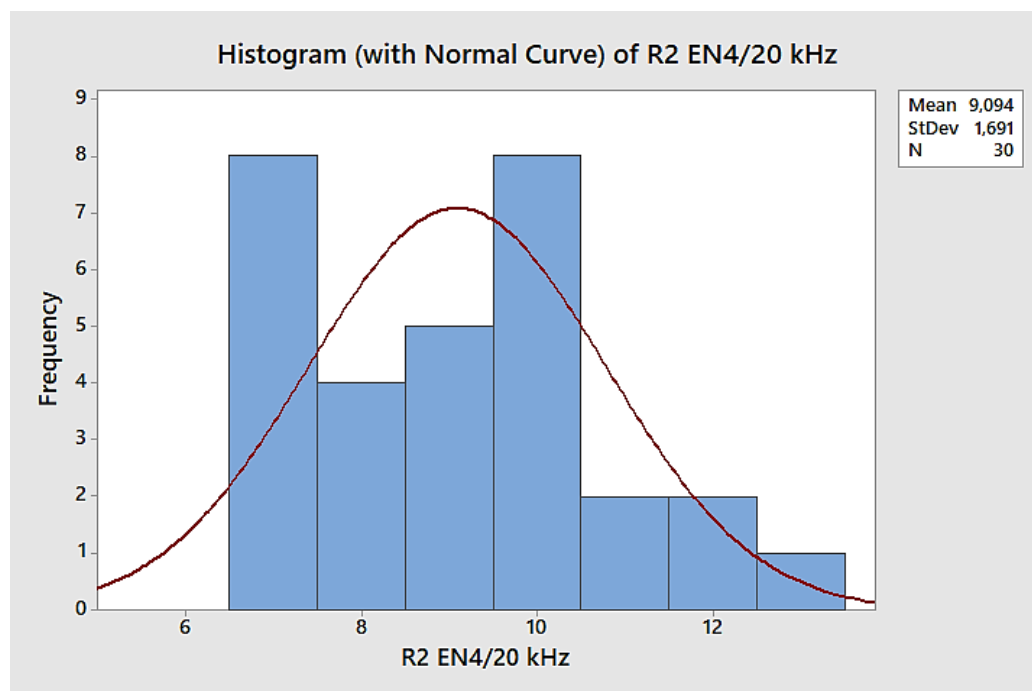
Výpočet je demonstrován pro data z měřicího bodu R1/R2 EN4/20 kHz, a to sice pro data ze snímače R2. Pro všechny ostatní datové soubory nicméně probíhal stejným způsobem.

V tab. 5 je uvedeno 30 nejvyšších hodnot z tohoto datového souboru (včetně korespondujícího data a času). Těchto 30 hodnot je seřazeno od nejvyšší po nejnižší.

Tab. 5 – 30 nejvyšších hodnot ze snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz

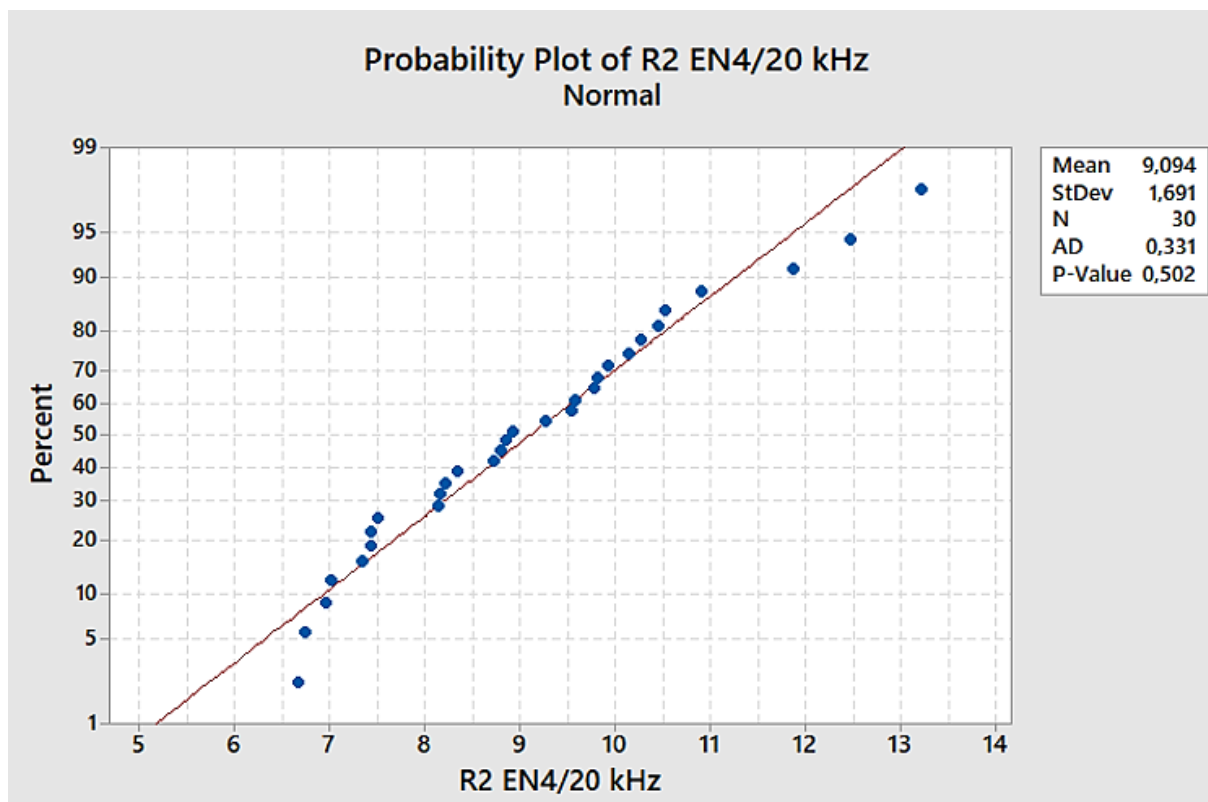
Datum a čas	Hodnota [gE PtP]	Datum a čas	Hodnota [gE PtP]	Datum a čas	Hodnota [gE PtP]
01.02.2019 11:57	13,22	20.03.2019 8:56	9,772	01.02.2019 11:27	8,154
01.02.2019 11:45	12,46	01.02.2019 11:30	9,57	01.02.2019 11:29	8,142
01.02.2019 11:25	11,87	01.02.2019 11:46	9,533	13.03.2019 8:23	7,491
01.02.2019 11:35	10,9	01.02.2019 11:45	9,268	12.03.2019 9:14	7,423
01.02.2019 11:55	10,52	01.02.2019 12:09	8,91	01.02.2019 11:51	7,419
01.02.2019 11:42	10,44	12.03.2019 12:53	8,846	01.02.2019 9:01	7,34
01.02.2019 12:05	10,26	22.02.2019 12:35	8,796	22.02.2019 12:35	7,001
01.02.2019 12:25	10,14	25.02.2019 8:35	8,715	12.03.2019 12:56	6,958
01.02.2019 11:48	9,917	05.02.2019 6:33	8,336	12.03.2019 9:16	6,726
14.03.2019 11:06	9,809	01.02.2019 12:23	8,216	12.03.2019 8:23	6,663

Následně byl pomocí programu Minitab sestrojen histogram z těch 30 dat. Ten je zachycen na obr. 55.



Obr. 55 – Histogram 30 nejvyšších hodnot ze snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz

Je vidět, že uspořádání četnosti dat není symetrické, ale přesto byla vyslovena hypotéza, že data pocházejí ze základního souboru, který má normální rozdělení. Následně byl pomocí programu Minitab proveden Anderson-Darlingův test dobré shody, aby bylo možné posoudit tuto hypotézu. Výsledek je zobrazen na obr. 56.



Obr. 56 – Anderson-Darlingův test dobré shody

Na základě provedeného testu hypotézu o původu dat ze základního souboru, který má normální rozdělení, na hladině významnosti 5 % nezamítáme. Nicméně tato data jsou pouze jedna ze dvou, u kterých to lze provést (druhým datovým souborem, u kterého tato hypotéza není zamítnuta, jsou data z měřicího bodu A1 EN/4 20 kHz).

U většiny ostatních datových souborů vychází p-hodnota menší než 0,05 a tím pádem musí být hypotéza zamítnuta. To je pravděpodobně způsobeno nedostatkem dat. Ve většině z datových souborů totiž je několik málo hodnot, které velmi vyčnívají nad zbývajících. Někdy jsou tyto hodnoty i několikanásobně vyšší než ostatní. Nebylo zjištěno, že by při získávání těchto dat došlo k hrubé chybě, a proto předpokládáme, že tato data jsou správná. Nicméně přítomnost těchto dat zapříčiňuje, že hypotéza o původu dat ze základního souboru s normálním rozdělením musí být zamítnuta. Jejich přítomnost také způsobila, že u některých datových souborů jsou hodnoty průměru a směrodatné odchylky nestandardní (viz tab. 6).

Po otestování původu dat byly spočteny samotné hodnoty provozních mezí, aby mohly být zadány do databáze v programu @ptitude Observer. Nejdříve byl spočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka těchto dat pomocí následujících vzorců (symboly x_1 až x_{30} označují celkové hodnoty získané metodou obálky zrychlení vibrací, symbol m je celkový počet hodnot, výpočet je demonstrován opět pro data z tab. 5):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_i}{30} = 9,09 \text{ gE PtP}, \quad (10)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{m-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - 9,09)^2}{30-1}} = 1,691 \text{ gE PtP}. \quad (11)$$

Následně byly spočteny hodnoty provozních mezí navržených podle práce Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku [30]. Úroveň varování byla navržena ve vzdálenosti 2 směrodatných odchylek od střední hodnoty, poplachová úroveň pak ve vzdálenosti 3 směrodatných odchylek od střední hodnoty (to je zobrazeno v tab. 6):

$$\text{Úroveň varování} = \bar{x} + 2 * s_x, \quad (12)$$

$$\text{Poplachová úroveň} = \bar{x} + 3 * s_x. \quad (13)$$

Tab. 6 – Vypočtené provozní meze vibrací

Měřicí bod	Snímač	Průměr	Směrodatná odchylka	Úroveň varování	Poplachová úroveň	Jednotka
R1/R2 ACC/10 kHz	R1	52,01	8,351	68,71	77,06	g PtP
	R2	11,18	3,578	18,34	21,91	g PtP
R1/R2 ACC/20 kHz	R1	49,43	10,340	70,11	80,45	g PtP
	R2	10,63	1,598	13,83	15,42	g PtP
R1/R2 ACC/40 kHz	R1	56,73	19,380	95,49	114,87	g PtP
	R2	11,53	3,098	17,73	20,82	g PtP
R1/R2 VEL/2 kHz	R1	22,92	35,480	93,88	129,36	mm/s efektivní hodnota
	R2	16,84	18,800	54,44	73,24	mm/s efektivní hodnota
R1/R2 VEL/5 kHz	R1	9,41	9,577	28,56	38,14	mm/s efektivní hodnota
	R2	5,70	11,720	29,14	40,86	mm/s efektivní hodnota
R1/R2 EN3/20 kHz	R1	41,14	4,828	50,80	55,62	gE PtP
	R2	8,56	1,004	10,56	11,57	gE PtP
R1/R2 EN4/20 kHz	R1	51,85	12,920	77,69	90,61	gE PtP
	R2	9,09	1,691	12,48	14,17	gE PtP
R1/R2 EN4/40 kHz	R1	37,92	13,580	65,08	78,66	gE PtP
	R2	7,68	2,453	12,59	15,04	gE PtP
A1 ACC/10 kHz	A1	17,42	5,218	27,86	33,07	g PtP
A1 ACC/20 kHz	A1	15,36	1,874	19,11	20,98	g PtP
A1 ACC/40 kHz	A1	16,78	4,015	24,81	28,83	g PtP
A1 VEL/2 kHz	A1	11,15	2,233	15,62	17,85	mm/s efektivní hodnota
A1 VEL/5 kHz	A1	2,77	0,616	4,00	4,62	mm/s efektivní hodnota
A1 EN3/20 kHz	A1	13,10	2,621	18,34	20,96	gE PtP
A1 EN4/20 kHz	A1	9,75	1,126	12,00	13,13	gE PtP
A1 EN4/40 kHz	A1	10,69	2,548	15,79	18,33	gE PtP

Před definitivním zavedením provozních mezí vypočtených pomocí metody 30MAX je nutné, aby firma DATRON přezkoumala výrobní programy firmy EMKO (alespoň ty programy, při nichž byly měřeny hodnoty, které byly následně použity v metodě 30MAX) a rozhodla, zda programy (a používané nastavení stroje při jejich provádění) jsou v souladu s parametry diagnostikovaného strojního zařízení DATRON M8Cube. Definitivní spočítání hodnot by vyžadovalo dostatečné množství dat pokrývajících veškerý výrobní program firmy. To nebylo možné v praxi realizovat, proto byly hodnoty provozních mezí spočteny jen z dat za období uvedené výše. Pokud by v praxi byla překročena hodnota definitivních provozních mezí, musela by okamžitě být provedena kontrola za účelem zjištění, zda byla tato událost způsobena zhoršením technického stavu zařízení nebo jeho nedovoleným namáháním.

7.4 Výsledky online vibrační diagnostiky na stroji 2

V této podkapitole jsou rozebrány výsledky testování ve firmě EMKO v měsících leden až březen 2019 na stroji 2 ve firmě EMKO. První část kapitoly je zaměřena na výsledky s důrazem na analýzu celkových hodnot a trendy celkových hodnot, druhá potom na výsledky s důrazem na analýzu obálky zrychlení a třetí popisuje výsledky zachycených událostí.

Za pomoci online systému IMx-8 je možné objektivně hodnotit technický stav diagnostikovaného strojního zařízení těmito metodami: [18]

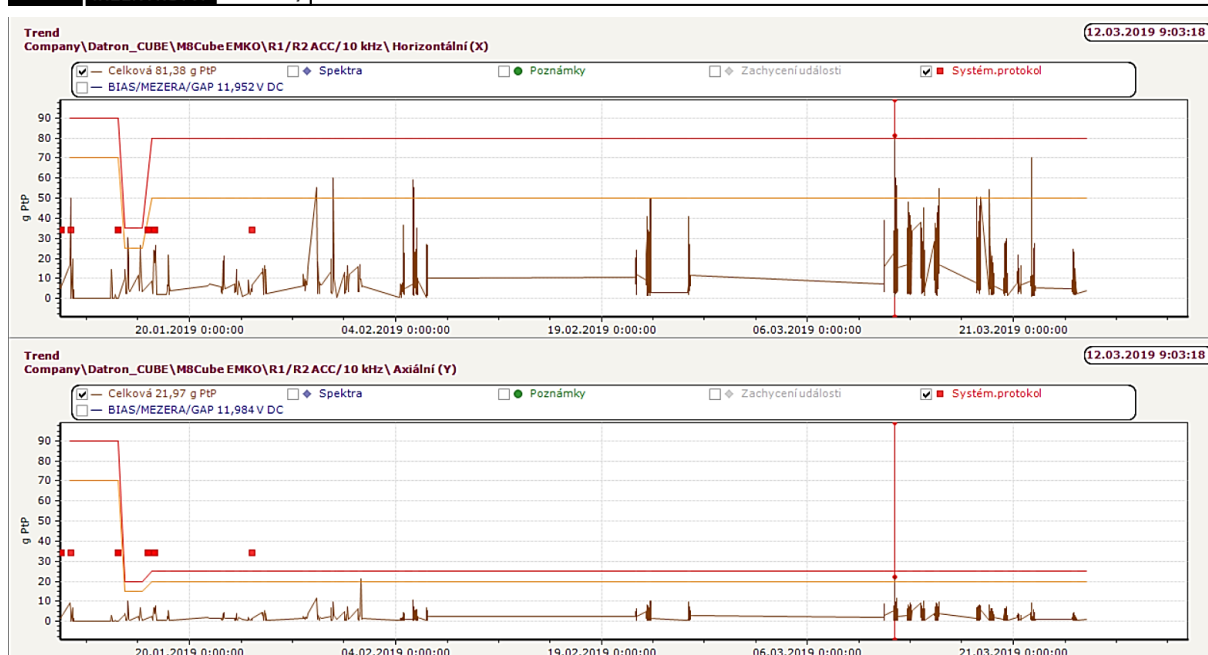
1. měření a analýza signálu vibrací,
 - měření a analýza časového průběhu signálu,
 - spektrální analýza signálu vibrací pomocí FFT,
2. měření a analýza obálky zrychlení,
 - měření a analýza časového průběhu obálky zrychlení,
 - spektrální analýza signálu obálky zrychlení pomocí FFT.

Obecně lze (na základě informací zjištěných z provedených experimentů) konstatovat, že pomocí měření a analyzování vibrací strojního zařízení lze dosáhnout asi nejvhodnější metody pro monitorování a vyhodnocování technického stavu strojů v průběhu celého jejich životního cyklu. Za nejdůležitější část vřeten strojů je možno považovat jejich ložiska.

7.4.1 Analýza celkových hodnot vibrací

Pravděpodobně nejvhodnější a nejvíce spolehlivou metodou pro vyhodnocování celkových hodnot vibrací je trendování (tedy porovnání naměřených hodnot s předchozími), protože to umožňuje jednoduché sledování vývoje hodnot celkových vibrací v průběhu provozu stroje 2 (v ideálním případě od začátku provozu či od poslední opravy). [30]

Na obr. 57 je zobrazen trendový graf zrychlení vibrací (pro stroj 2) z časového období od 10. 1. 2019 (zahájení měření po již zmíněném hackerském útoku) do 26. 3. 2019. Jedná se o data z měřicího bodu R1/R2 ACC/10 kHz. Horní část obrázku zachycuje trend ze snímače R1, spodní část potom zachycuje trend ze snímače R2.



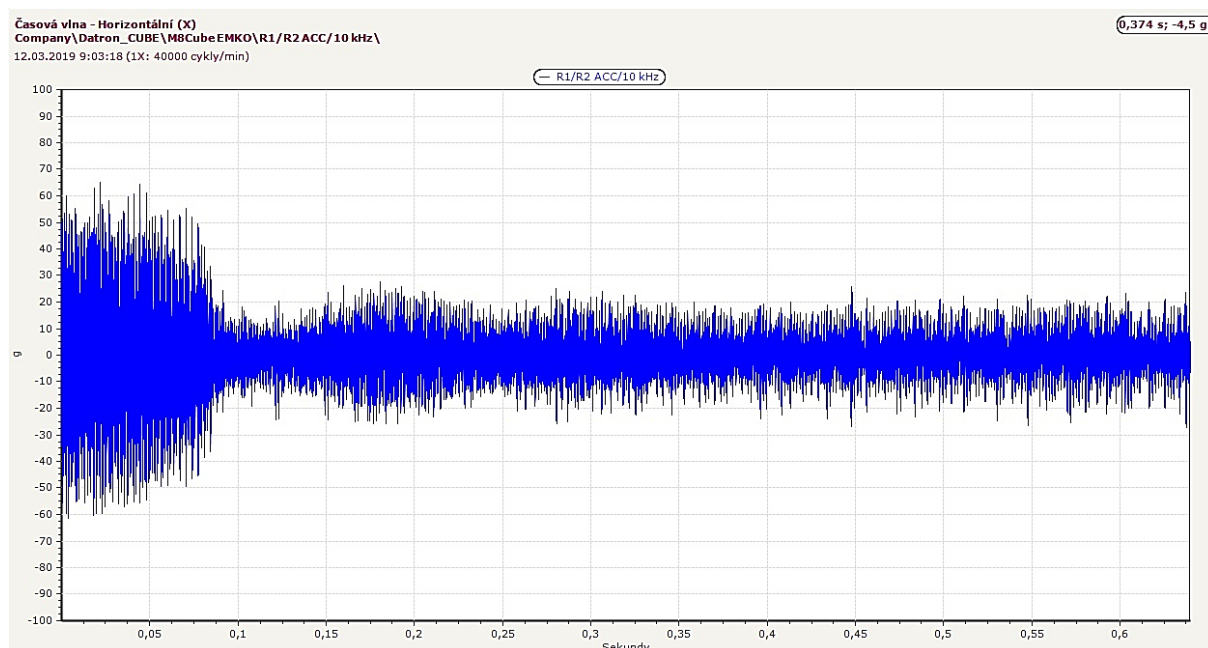
Obr. 57 – Trend zrychlení vibrací pro měřicí bod R1/R2 ACC/10 kHz

Lze konstatovat, že celkové hodnoty zrychlení vibrací jsou dost rozdílné. Největší vliv na to má konkrétní výrobní operace. V několika případech byla překročena úroveň varování, nebo dokonce i poplachová úroveň. Data byla ovšem naměřena před použitím metody 30MAX pro stanovení velikostí těchto mezí – měření je z doby, kdy byly meze stanoveny expertním odhadem (v grafech je i vidět, že hodnoty mezí byly v průběhu měření několikrát změněny).

Přestože je trendování vhodný postup, bez další analýzy není možné blíže vadu určit. Proto je vhodné pomocí softwaru @ptitude Observer zvýraznit v grafu místa (pomocí zaškrtnutím možnosti „Spektra“ - ta je vidět i nad oběma grafy na obr. 57), pro která byla provedena měření (v tomto případě je každou minutu vytvořen jeden takový bod) a následně pro zvolený bod (např. takový, kdy byla překročena některá z definovaných mezí) jednoduše zobrazit i graf spektra (viz podkapitola 6.1 Zrychlení vibrací) či časové vlny. [30]

Graf časové vlny zobrazuje relativně krátký časový úsek měřených vibrací a může pomoci odhalit závadu, která není zřejmá např. z frekvenčního spektra. Má charakteristický tvar – např. impulsní, periodický či chaotický. [30]

V grafu na obr. 57 lze vidět překročení poplachové úrovně (nastavené na 80 g PtP) 12. 3. 2019 v 9:03 v měřicím směru R1. Celková hodnota zrychlení vibrací dosáhla 81,38 g PtP. Druhý měřicí směr (R2) také registruje problém, ale překročena byla pouze úroveň varování. Graf časové vlny pro toto měření je na obr. 58.



Obr. 58 – Časová vlna měření překračujícího poplachovou úroveň

Jak ukazuje graf časové vlny, trvalo asi 0,1 vteřiny, než se hodnota zrychlení vibrací snížila. V kombinaci s grafem spektra a zachycením události je možné tuto situaci analyzovat, zjistit na které frekvenci byla amplituda nejvyšší a co poplach způsobilo.

Protože k události došlo před výpočtem poplachových úrovní pomocí metody 30MAX, tak pravděpodobně překročení meze neznamenal žádnou kritickou závadu na stroji. V praxi by ale takováto událost okamžitě měla vést k odpovídajícím opatřením.

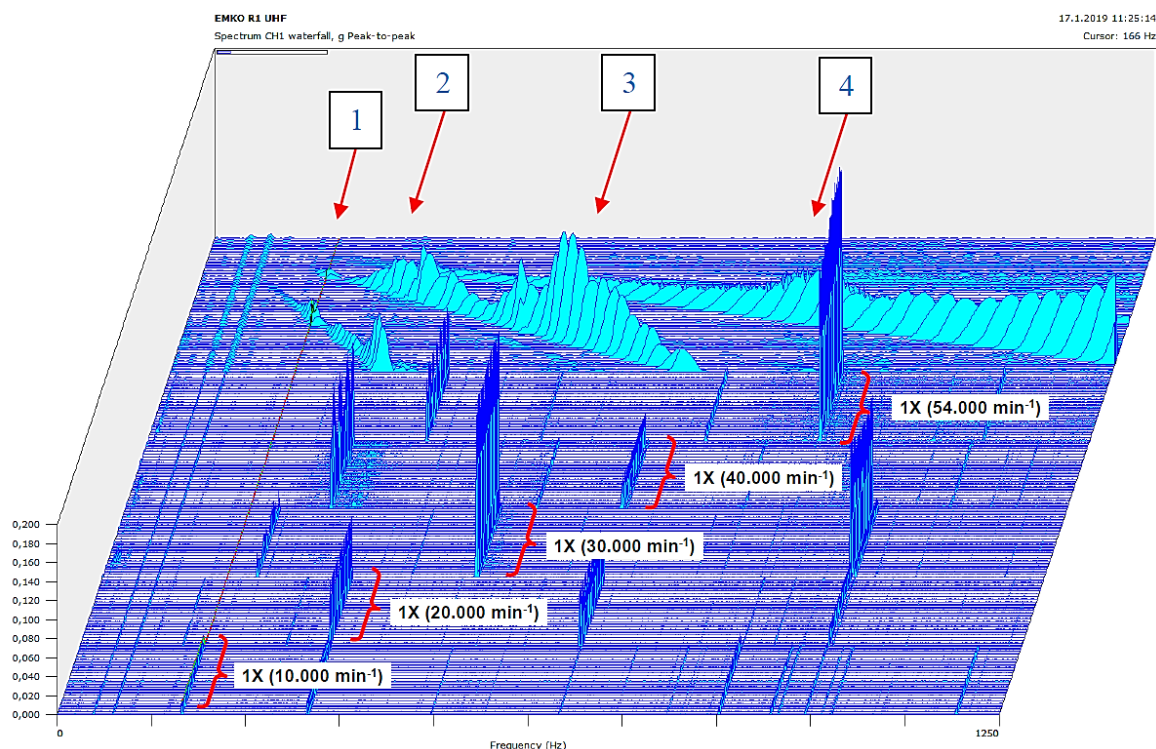
Obdobnými způsoby lze sledovat trend i u všech ostatních měřicích bodů.

Významné frekvence pro frekvenční analýzu

Zobrazení otáčkové frekvence 1X a jejích harmonických násobků v grafu spektra bylo již demonstrováno v podkapitole 6.1 Zrychlení vibrací. Základem pro frekvenční analýzu je znalost těchto frekvencí, jakož i dalších charakteristických frekvencí (např. frekvence otáčení klece ložiska, frekvence vnějšího kroužku BPFO atd. – jejich výpočet byl uveden v podkapitole 4.3.1 Ložiska vřetene Jäger). [30]

Charakteristické frekvence (i rezonanční oblasti) je možné zjistit i experimentálně, porovnáním několika měření při různých otáčkách. Lze rovněž odhadnout tlumení soustavy v jednotlivých rezonančních oblastech. [30]

To je předvedeno na obr. 59. Ten zobrazuje kaskádový diagram spekter zrychlení vibrací při situaci, kdy stroj 2 běžel bez zátěže za postupného zvyšování otáček až na 90 % maximálních otáček ($10\,000\text{ min}^{-1}$, $20\,000\text{ min}^{-1}$, $30\,000\text{ min}^{-1}$, $40\,000\text{ min}^{-1}$ a $54\,000\text{ min}^{-1}$).



Obr. 59 – Měření místo R1 – kaskádový diagram spekter zrychlení vibrací při změně otáček a doběhu [30]

Legenda k obr. 59:

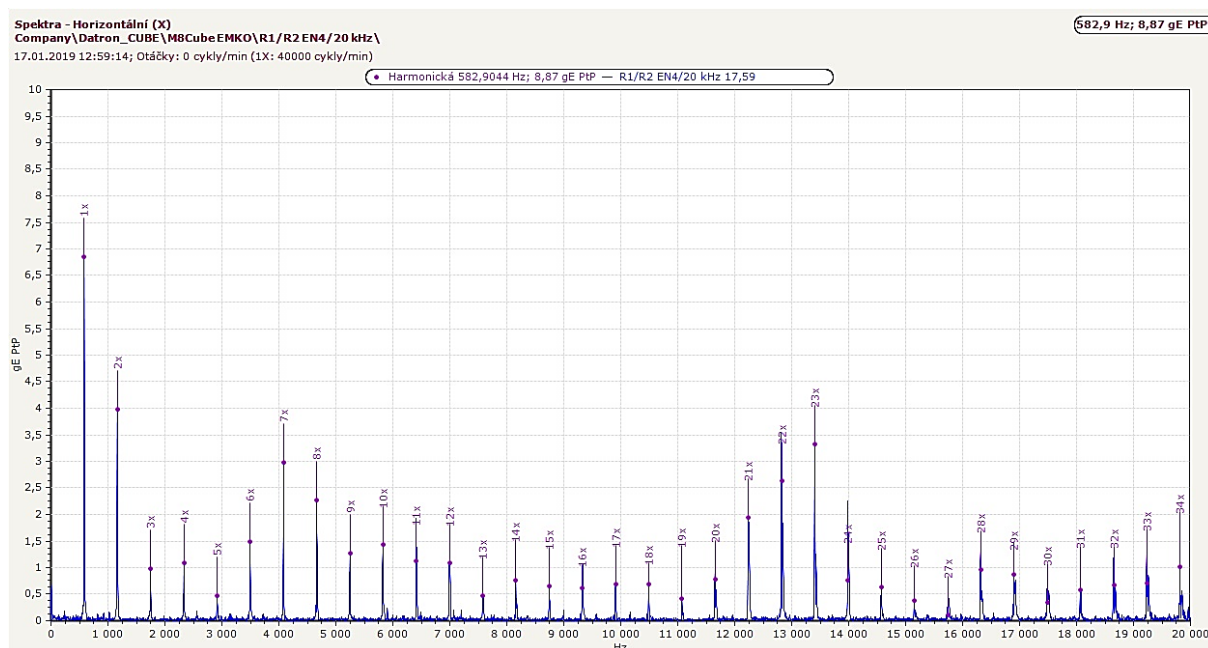
1 – 166 Hz (10 000 min⁻¹), 2 – 310 Hz (18 600 min⁻¹), 3 – 520 Hz (31 200 min⁻¹), 4 – méně výrazná 840 Hz (50 400 min⁻¹).

Jak je vidět, nejvýraznější a nejméně zatlumená rezonanční oblast soustavy je kolem 520 Hz (tomu odpovídá 31 200 RPM). Nárůst amplitudy zrychlení vibrací je v této oblasti dost patrný a bylo by vhodné neprovozovat včetně v této oblasti. Druhou málo zatlumenou rezonanční oblastí je oblast kolem 310 Hz (18 600 RPM). Další výrazné nárůsty amplitudy jsou zjištěny také při souběhu otáčkové frekvenční složky a dalších rezonančních oblastí.

7.4.2 Analýza obálky zrychlení

V této podkapitole jsou analyzovány výsledky měření z měřicích bodů typu obálka (označených v databázi EN).

S přihlédnutím k očekávaným frekvenčním složkám byl zvolen frekvenční rozsah do 20 kHz, resp. 40 kHz, a byly zvoleny 3. a 4. filtr obálky (viz 5.3.4 Testovací databáze). Ve všech případech ve frekvenčních spektrech obálky dominují harmonické násobky otáčkové frekvence (bez přítomnosti poruchových frekvencí ložisek). Je tedy možné konstatovat, že včetně ložiska jsou v dobrém stavu. To je ilustrováno na obr. 60, který zachycuje graf spektra obálky zrychlení pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz ze dne 17.1.2019 12:59.

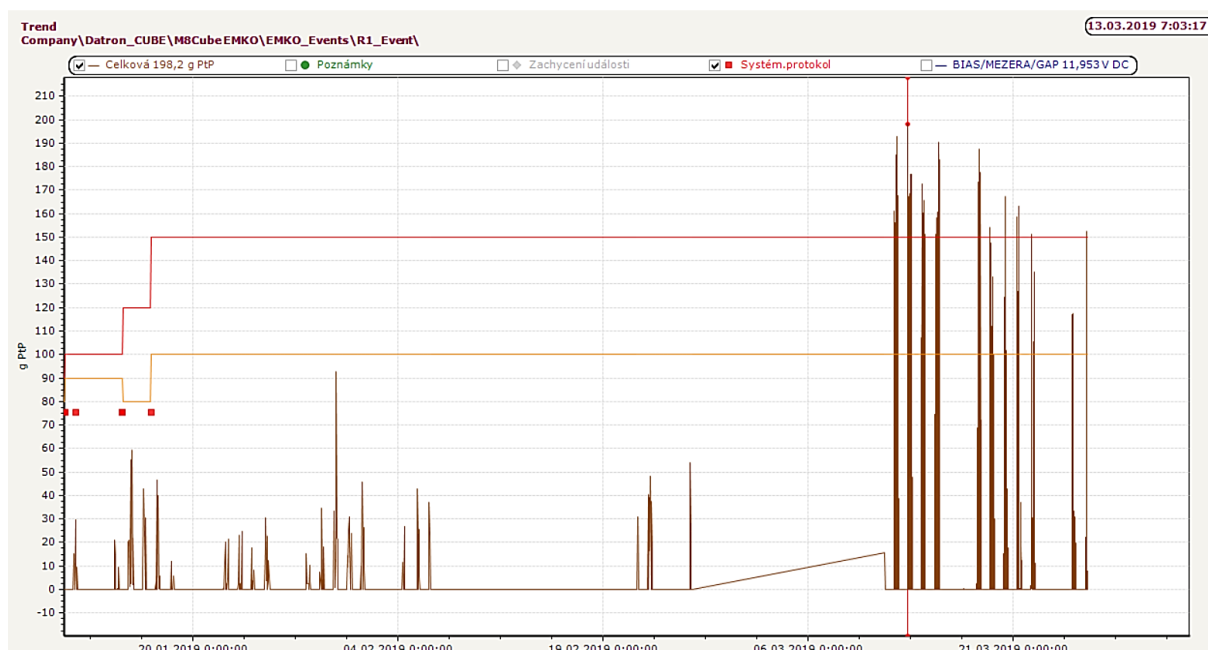


Obr. 60 – Graf spektra obálky zrychlení ze dne 17.1.2019 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz při otáčkách 35 250 RPM, první radiální směr

7.4.3 Analýza zachycených událostí

Dalším bodem vhodným k analýze jsou zachycené události (Events).

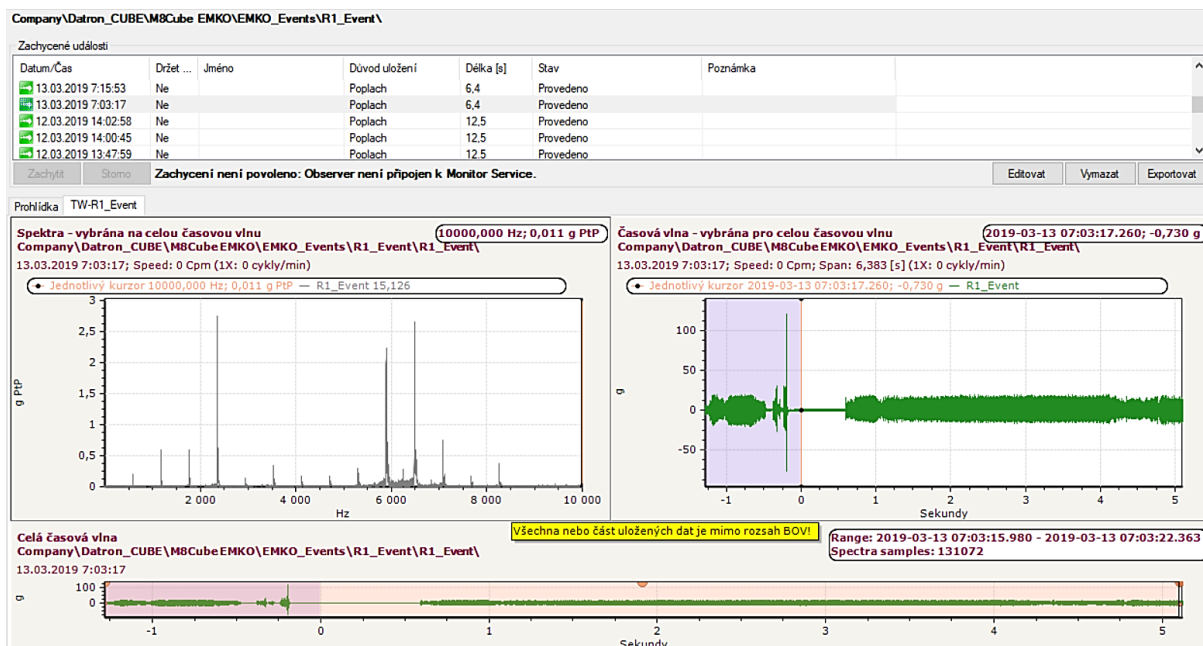
Na obr. 61 je zachycen graf trendu celkových hodnot u měřicího bodu R1_Event (typ měřicího bodu je Zachycení události) za poslední čtvrtletí (počítáno 26. 3. 2019).



Obr. 61 – Trend měřicího bodu R1_Event

Z grafu je vidět, že provozní meze byly hned několikrát překročeny (což iniciovalo zachycení události). Nejvyšší hodnota byla naměřena 13. 3. 2019 v 7:03. Pro podrobnější analýzu této konkrétní události je potřeba tuto konkrétní událost vyhledat v seznamu všech

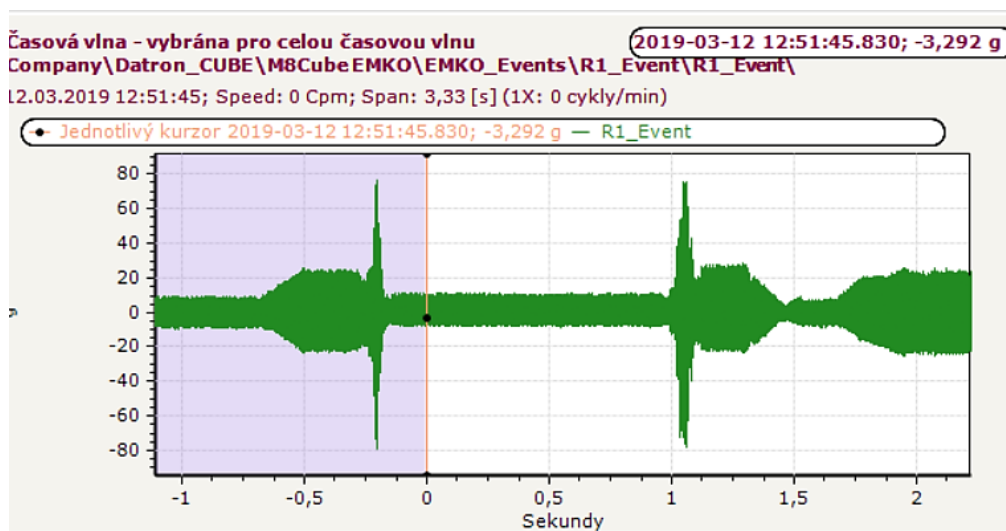
zachycených událostí a následně si zobrazit detail – např. její frekvenční spektrum a časovou vlnu (viz obr. 62).



Obr. 62 – Detail zachycené události z 13. 3. 2019 7:03, měřicí bod R1_Event

Zatímco ve frekvenčním spektru (vlevo) nelze velké zrychlení vidět, v časové vlně události (vpravo) je jasně vidět, že v jednu chvíli byla hodnota zrychlení 198,8 g PtP.

Analýzou jednotlivých zachycených událostí bylo zjištěno, že příčinou poplachů je zvýšené zatížení vřetene při obrábění – zejména při začátku a u konce jednotlivých částí výrobních operací. To lze usuzovat z toho, že zvýšení vibrací má určitý časový náběh (viz obr. 63), tj. nejedná se o náraz na překážku.



Obr. 63 – Záznam události z 12. 3. 2019 12:51, měřicí směr R1

Důvodem pro vysoké naměřené hodnoty vibrací mohou opět být i neznámé signály v napájecí síti. V jednom případě dokonce byly hodnoty vibrací (zobrazené v zachycené události) tak vysoké, že byla okamžitě provedena telefonická konzultace. V ní obsluha stroje

z firmy EMKO upřesnila, že se pravděpodobně jednalo o rušení signálu vyvolaném svařováním v blízkosti stroje 2.

Obecně lze z analýzy zachycených událostí vyvodit, že:

- Záznam událostí je vhodným nástrojem pro analýzu abnormálních událostí.
- Typicky se nejedná o události typu „náraz“, ale spíše o událost, která je pravděpodobně iniciována příliš rychlým zajištěním nástroje do materiálu (případně jeho rychlým vyjetím).
- Celkové hodnoty zrychlení vibrací se hlavně ve směru R1 pohybují ve vysokých číslech (i nad 150 g). Do budoucna je nutné s výrobcem vřetene vyřešit, zda je takové zatížení vřetene přípustné.

8 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

V průběhu instalování i aplikování online vibrační diagnostiky na oba stroje vyplynula na povrch řada problémů. V této podkapitole se práce zabývá právě tímto tématem a dává doporučení do budoucna.

8.1 Rodný list diagnostikovaného zařízení

Prvním doporučením je vytvoření tzv. rodného listu zařízení. Protože každé zařízení je z hlediska provozních vlastností unikátní, je obtížné říci, které hodnoty vibrací jsou v pořádku a které již ne. Normy (např. ČSN ISO 20816-1:2018. Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny) lze použít jako pomocné kritérium, ale jsou spíše informativní.

Řešením by mohlo být vytvoření prvotního měření (již zmíněného rodného listu) před začátkem trendování. Tento rodný list by byl vytvořen při instalaci zařízení ve firmě a poté aktualizován po každé opravě (či jiné významné události, jako například přemístění zařízení). Takto by bylo jednoduché sledovat, jak se vyvíjí hodnota vibrací u daného stroje.

8.2 Opakovatelné podmínky

Aby byla dlouhodobá pravidelná analýza co nejpřesnější, je třeba aby byla prováděna v co nejstálějších podmínkách a za stejného pracovního režimu včetně stroje. Je totiž jasné, že při porovnání naprosto odlišných operací, každé provedené za odlišných podmínek, nemůže vést k objektivním výsledkům.

Nicméně výrobní program společnosti může být tak variabilní, že dodržení této podmínky se může ukázat jako velmi obtížné. Proto pokud nelze opakovatelnost podmínek testování dostatečně splnit, řešením by mohlo být provádění pravidelných periodických měření (např. každý týden) ve zvoleném testovacím režimu. Testovací režim by mohl spočívat v jednoduché finančně nenáročné výrobní operaci, jejímž výstupem by byl definovaný zkušební výrobek.

V případě, že ani tato podmínka by nebyla pro danou společnost splnitelná, by bylo možností provádět pravidelná periodická měření při chodu zařízení bez zátěže. Tento chod by proběhl při zvolených otáčkách, případně za předem stanoveného zvyšování otáček. Nevýhodou třetího případu je, že při chodu zařízení naprázdno mohou být hodnoty vibrací tak nízké, že by mohlo hrozit neodhalení některé závady.

8.3 Testovací nástroj

Při provádění testovacího provozu (vysvětleného v předchozí podkapitole) by bylo vhodné používat stále tentýž nástroj, speciálně určený výlučně pro testovací provoz zařízení. Pokud by totiž testování probíhalo pokaždé s jiným nástrojem (např. jednou s úplně novým nástrojem, jindy se starým opotřebovaným), mohly by být výsledky testování (a stejně tak i objektivita těchto výsledků) silně ovlivněny.

8.4 Umístění diagnostikovaného strojního zařízení

Při aplikaci online vibrační diagnostiky je důležité dát pozor i na to, kde je diagnostikovaný stroj umístěn. Doporučena je pevná podlaha. Pokud je stroj umístěn na tenké plošině (která vlivem chodu samotného diagnostikovaného zařízení i vlivem ostatních výrobních procesů v hale vibruje a otřásá se), je zjevné, že výsledky měření budou významným dílem ovlivněny a nebudou mít příliš velkou vypovídající hodnotu.

8.5 Zálohování databáze

V důsledku hackerského útoku byla v průběhu roku ztracena část dat naměřených na stroji 1 i na stroji 2. Protože do té doby nebylo pečlivě prováděno zálohování, přišli jsme asi o jeden měsíc měření.

Proto je doporučeno, aby zálohování databáze bylo provedeno v pravidelných intervalech, např. jedenkrát týdně. V případě zaznamenání jakékoli významné události (např. po provedení experimentu na strojním zařízení) je možné a vhodné provést navíc okamžitou zálohu dat.

9 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na zavedení systému online vibrační diagnostiky na strojní zařízení DATRON M8Cube. Systém byl nejdříve otestován z hlediska jeho funkčnosti na stroji DATRON M8Cube v obchodním centru firmy DATRON v Brně (tedy na stroji 1 s vřetenem Weiss) a následně byl přemístěn a uveden do funkčnosti na jiném strojním zařízení DATRON M8Cube, tentokrát ve firmě EMKO v Brně (tedy na stroji 2 s vřetenem Jäger).

Prvním z cílů diplomové práce bylo zhodnotit současný stavu technické diagnostiky strojů DATRON M2Cube (s důrazem na vibrační diagnostiku). Tento cíl byl splněn v podkapitole 5.2 Současný stav technické diagnostiky stroje. Bylo zjištěno, že vibrační diagnostika na stroji nebyla aplikována. Prováděna byla kruhová interpolace (ve smyslu ČSN ISO 230-4 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů) pomocí Ballbaru a také např. postupná kontrola vřetene pomocí checklistu.

Druhým z cílů bylo provést analýzu konstrukce a funkce vřetene pro účely diagnostiky. Tím se zabývala zejména kapitola 4 Vřeteno frézovacího stroje. V této kapitole byla popsána konstrukce vřetene frézovacího stroje, jeho funkce a následně byla pozornost věnována (dle pokynů vedoucího diplomové práce) specifickému vřetenu (Vysokofrekvenční vřeteno Jäger), protože právě toto vřeteno je využíváno strojem 2 a na něm byla vibrační diagnostika aplikována (vřeteno, využívané strojem 1, sloužilo pouze k otestování funkčnosti měření a přenosu dat, proto nebyla jeho analýza prioritou). Zvláštní pozornost byla věnována hlavně ložiskům vřetene, protože ta jsou z pohledu vibrační diagnostiky asi jeho nejdůležitější částí. Součástí kapitoly byl rovněž výpočet frekvencí ložiskových závad.

Třetím cílem bylo navržení systému měření vibrací pro online diagnostiku stroje. Tento systém byl rozebrán v podkapitole 5.3 Popis online systému vibrační diagnostiky. Měřeno je zrychlení vibrací, rychlost vibrací a obálka zrychlení vibrací (pokaždé v několika měřicích rozsazích a pokaždé u dvou radiálních a jednom axiálním směru). Systém měření vibrací byl testován byl na stroji 1 (výsledky tohoto testování jsou interpretovány v kapitole 6) a následně byl zaveden na stroj 2. Navržena byla rovněž i měřicí databáze, která byla pomocí softwaru @ptitude Observer využívána k monitorování a analýze naměřených hodnot.

Čtvrtým z cílů diplomové práce byl návrh hodnocení změn technického stavu vřetene. Možnostem monitorování a hodnocení změn technického stavu vřetene se práce věnuje celou kapitolu 6 Výsledky testování Systému na stroji 1 i kapitolu 7 Zavedení online vibrodiagnostiky na stroji 2. Těchto možností je celá řada, velmi dobrými příklady je např. sledování trendu celkových hodnot vibrací nebo analýza Zachycených událostí. Součástí řešení tohoto problému je i statistická metoda 30MAX, která slouží k experimentálnímu určení provozních mezí vibrací (spočteny byly úrovně varování i poplachové úrovně pro jednotlivé měřicí body).

V kapitole 8 jsou v souladu s pátým z cílů diplomové práce uvedeny návrhy a doporučení pro praxi. Tyto návrhy vycházejí z problémů, na které se narazilo v průběhu vypracovávání této práce, a ze zkušeností, které jsem získal při realizaci online vibrační diagnostiky.

Zavedení systému online vibrační diagnostiky na stroj 2 je velice složitý a obsáhlý problém a již na začátku bylo jasné, že výsledkem nebude a ani nemůže být kompletní a stoprocentně funkční systém. Například hodnoty provozních mezí, spočtené metodou

30MAX, nemohou být úplně směrodatné, protože nebyly zmapovány veškeré výrobní procesy firmy EMKO. Tím pádem je možné, že při některém z nezmapovaných procesů budou naměřeny ještě vyšší hodnoty (které ale pořád budou z hlediska zatěžování stroje stále v pořádku) a hodnoty provozních mezí by měly být upraveny tak, aby korespondovaly s těmito novými hodnotami. Druhým problémem je neznámý signál (z externích zdrojů), který může způsobit, že naměřené hodnoty neodpovídají skutečnosti (příkladem mohou být již dříve zmíněné vysoké hodnoty vibrací naměřené během svařování prováděného v blízkosti diagnostikovaného zařízení).

I přes tyto nedostatky je online vibrační diagnostika velice dobrým způsobem, jak monitorovat stav stroje a předcházet jeho přetěžování, či v horším případě jeho poškození. Poznatky, získané díky této diagnostice, mohou být pro majitele diagnostikovaného zařízení velmi přínosné a díky nim je možné předejít finančním ztrátám i dalším problémům.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TOMEH, Elias. *Hlučnost a vibrace automobilových převodovek v souvislosti s identifikovanými závadami obráběcích strojů*. Liberec, 2008. Habilitační práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
- [2] HAMMER, Miloš. Přednášky z předmětů: Technická diagnostika I (XT1), Technická diagnostika II (XT2), Spolehlivost I (XS1). Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2018-02-11].
- [3] Vibrační diagnostika. *Adash: Rozumíme řeči vibrací* [online]. [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/vibracni-diagnostika/vibracni-diagnostika/>
- [4] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů:: část Vibrační diagnostika*. Ostrava, 2012, 142 s. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [5] JANKOVÝCH, Róbert, Miloš HAMMER and all. *Vibration Condition Monitoring*. Brno, 2015. VUT Brno.
- [6] JANKOVÝCH, Róbert. *Vibrační diagnostika odměrových mechanismů tanků*. Brno, 2004. Habilitační práce. Vojenská akademie v Brně.
- [7] ČSN ISO 2041. *Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník*. Třetí vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] LIPUS, Tadeáš. *Vibrační a související diagnostika vysokootáčkových strojů*. Brno, 2018. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. VUT Brno. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [9] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [10] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [11] VALENT, Ondrej, Miloš GALÁD a Ľubomír KAČMÁR. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA I*. Praha.
- [12] *Crystal instruments* [online]. 2014 [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: http://www.go-ci.in/Vibration_Data_Collector-40.aspx
- [13] ČSN ISO 20816-1. *Vibrace-Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [14] ZUTH, Daniel, VDOLEČEK František. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [15] *SVM Tech: produkty a služby pro měření hluku a vibrací* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz>
- [16] *HBM X60: Instructions for use*.

- [17] VOJÁČEK, Antonín. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. *Automatizace.hw.cz: Rady a poslední novinky z oboru*[online]. 2.2.2015 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [18] JANKOVÝCH, Róbert, Miloš HAMMER a Tadeáš LIPUS. *Měřicí zpráva I: Testování funkčního vzorku on-line systému vibrační diagnostiky*. Brno, VUT FSI, 2018.
- [19] Technical associates of Charlotte, P.C. R-0894-4. *ILUSTROVANÁ TABULKA PRO DIAGNOSTIKU VIBRACÍ dle Berryho*. 9/2005.
- [20] JERMANN, Michael. *All about Plain Bearings* [online]. 22.1.2015 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/plain-bearings/>
- [21] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [22] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [23] Machine tools. Eunda: Elektromaschine und Antriebe [online]. b.r. [cit. 2019-02-20]. Dostupné také z: <http://www.eunda.ch/en/applications/machine-tools.html>
- [24] *Jäger: High performance spindels* [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.alfredjaeger.de/en/z-line/10304011>
- [25] *GMN: Präzision aus Tradition* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://www.gmn.de/en/>
- [26] *DATRON TECHNOLOGY* [online]. [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://www.datrontechnology.cz/>
- [27] *Ballbar testing explained* [online]. Wotton-under-Edge: Renishaw, 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/ballbar-testing-explained--6818>
- [28] *SKF CZ, a.s.* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/index.html>
- [29] SKF USA Inc, *Uživatelský manuál pro SKF @ptitude Observer v. 10.1*. 2012
- [30] JANKOVÝCH, Róbert, Miloš HAMMER a Tadeáš LIPUS. *Metodika I: Metodika pro on-line diagnostiku*. Brno, VUT FSI, 2019.

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam obrázků

- Obr. 1 – Způsoby vyjádření amplitudy sinusového signálu [11]
- Obr. 2 – Vynucené kmitání za působení harmonické budící síly [4]
- Obr. 3 – Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou [4]
- Obr. 4 – Kmitání buzené silou náhodného průběhu [4]
- Obr. 5 – Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací [4]
- Obr. 6 – Snímač rychlosti [4]
- Obr. 7 – Základní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů [14]
- Obr. 8 – Příspěvky od jednotlivých vibrujících částí zařízení a jejich zobrazení v časové vlně a frekvenčním spektru [17]
- Obr. 9 – Měření fáze ve vibrodiagnostice [5]
- Obr. 10 – Úhlová a paralelní nesouosost [4]
- Obr. 11 – Součásti valivého ložiska [4]
- Obr. 12 – Popis základních částí elektrovřetene [23]
- Obr. 13 – Vysokofrekvenční vřeteno Jäger – pohled z boku a zezadu [24]
- Obr. 14 – Kuličkové ložisko [25]
- Obr. 15 – Kuličkové ložisko HY SM 04843
- Obr. 16 – Umístění ložisek ve vřetenu Jäger 2kW
- Obr. 17 – CNC frézovací zařízení DATRON M8Cube [26]
- Obr. 18 – Kruhová interpolace pomocí Ballbaru [27]
- Obr. 19 – Měření upínací síly
- Obr. 20 – Aktuální zatížení vřetene
- Obr. 21 – IMx-8 nainstalovaný ve skříni CMON 4150
- Obr. 22 – Detail připojení jednotlivých snímačů [18]
- Obr. 23 – Osmikanálový měřicí systém SKF Multilog IMx-8 [28]
- Obr. 24 – Snímač CMAC244-1D [28]
- Obr. 25 – Umístění snímačů na strojním zařízení ve firmě DATRON
- Obr. 26 – Detail snímačů 1 a 3
- Obr. 27 – Logická architektura SKF @ptitude Observer [29]
- Obr. 28 – Zkušební databáze
- Obr. 29 – Vlastnosti měřicího bodu – Sběr - program @ptitude Observer
- Obr. 30 - Referenční HSK frézy, vlevo jednobřítá, vpravo dvoubřítá, obě upevněné v nástrojové kleštině HSK [18]
- Obr. 31 – Pozice stroje pro vibrační měření při provozu bez zátěže
- Obr. 32 – Zkušební obrobek
- Obr. 33 – Graf spektra zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 11:30 pro měřicí bod R1 ACC/40k (radiální směr č. 1)
- Obr. 34 – Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod R1 ACC/10k (radiální směr č. 1)
- Obr. 35 – Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod R2 ACC/10k (radiální směr č. 2)
- Obr. 36 – Graf trendu celkových hodnot zrychlení vibrací z 18. 10. 2018 pro měřicí bod A1 ACC/10k (axiální směr)

Obr. 37 – Srovnání spekter zrychlení měřených s různými rozsahy (měřicí body R2 ACC/10k, R2 ACC/20k a R2 ACC/40k)

Obr. 38 – Výsledky měření zrychlení vibrací měřicím bodem R1-R2 ACC/10k

Obr. 39 – Trend hodnot rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018

Obr. 40 – Vícenásobný trend hodnot rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018

Obr. 41 – Frekvenční spektra rychlosti vibrací ze dne 18. 10. 2018 v čase 11:57 pro různé měřicí body

Obr. 42 – Graf vícenásobného trendu pro hodnoty obálky zrychlení ve všech měřicích směrech

Obr. 43 – Frekvenční spektrum obálky zrychlení IV v radiálním směru č. 1 ze dne 18. 10. 2018

Obr. 44 – Pohled na přilepené snímače zrychlení R1, R2, A1

Obr. 45 – Detail snímače R1

Obr. 46 – Detail snímače R2

Obr. 47 – Detail snímače A1

Obr. 48 – Databáze pro diagnostiku stroje 2

Obr. 49 – Výrobek operace „Přední čelo Raspberry“

Obr. 50 – Rychlost vibrací při frézování výrobku „Přední čelo Raspberry“

Obr. 51 – Výrobek operace „Raspberry-B“

Obr. 52 – Rychlost vibrací při frézování výrobku „Raspberry-B“

Obr. 53 – Příklady výrobků frézovaných pomocí stroje 2

Obr. 54 – Trend rychlosti vibrací

Obr. 55 – Histogram 30 nejvyšších hodnot ze snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz

Obr. 56 – Anderson-Darlingův test dobré shody

Obr. 57 – Trend zrychlení vibrací pro měřicí bod R1/R2 ACC/10 kHz

Obr. 58 – Časová vlna měření překračujícího poplachovou úroveň

Obr. 59 – Měření místo R1 – kaskádový diagram spekter zrychlení vibrací při změně otáček a doběhu [30]

Obr. 60 – Graf spektra obálky zrychlení ze dne 17. 1. 2019 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz při otáčkách 35 250 RPM, první radiální směr

Obr. 61 – Trend měřicího bodu R1_Event

Obr. 62 – Detail zachycené události z 13. 3. 2019 7:03, měřicí bod R1_Event

Obr. 63 – Záznam události z 12. 3. 2019 12:51, měřicí směr R1

11.2 Seznam tabulek

Tab. 1 – Přehled použitých metod (včetně příslušných rozsahů) měření vibrací [18]

Tab. 2 – Obálka zrychlení zařízení [5]

Tab. 3 – Hodnoty „Faktoru trvání“ v závislosti na zvoleném frekvenčním rozsahu a počtu vzorků [30]

Tab. 4 – Terminologie pro provozní meze vibrací [30]

Tab. 5 – 30 nejvyšších hodnot ze snímače R2 pro měřicí bod R1/R2 EN4/20 kHz

Tab. 6 – Vypočtené provozní meze vibrací

11.3 Seznam symbolů

MTTF	střední doba do poruchy [h]
$f(t)$	časový průběh budící síly [N]
F	amplituda budící síly [N]
ω	kruhová frekvence budící síly [rad/s]
t	čas [s]
φ_F	počáteční fázový posuv
$x(t)$	časový průběh výchylky kmitání [μm]
X	amplituda vynuceného kmitání [μm]
φ	fázový posuv (zpoždění výchylky za budící silou) [-]
P	piezoelektrický prvek
B	těleso snímače
M	setrvačná hmota
R	předpínací prstenec
S	předpínací disk
f_s	vzorkovací frekvence [Hz]
n	otáčky rotoru [Hz]
N	počet valivých elementů [-]
B_d	průměr valivého elementu [mm]
P_d, dm	roztečný průměr valivého elementu [mm]
φ, α_0	kontaktní úhel [°]
D	vnější průměr ložiska [mm]
B	šířka ložiska [mm]

11.4 Seznam zkratk

RMS	efektivní hodnota (root mean square)
Peak	špičková hodnota
PtP	hodnota špička-špička
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation)
AEE	Měření a analýza obálky akustické emise (Acoustic Emission Enveloping)
BPFI	Závada na vnitřním kroužku
BPFO	Závada na vnějším kroužku
BSF	Závada na valivém elementu
FTF	Závada na kleci
R1	první radiální směr
R2	druhý radiální směr
A1	axiální směr

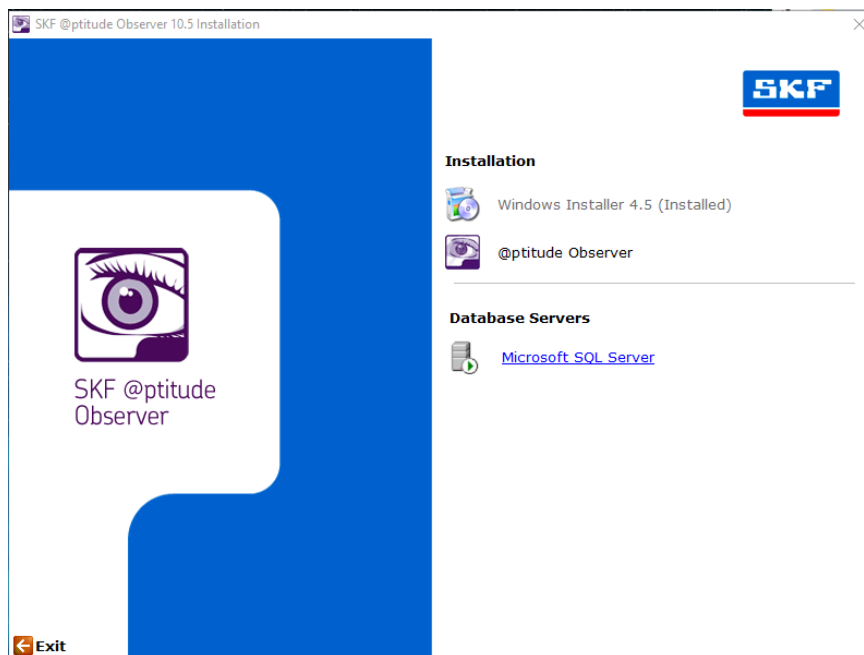
12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Popis instalace programu @ptitude Observer a následné připojení databáze

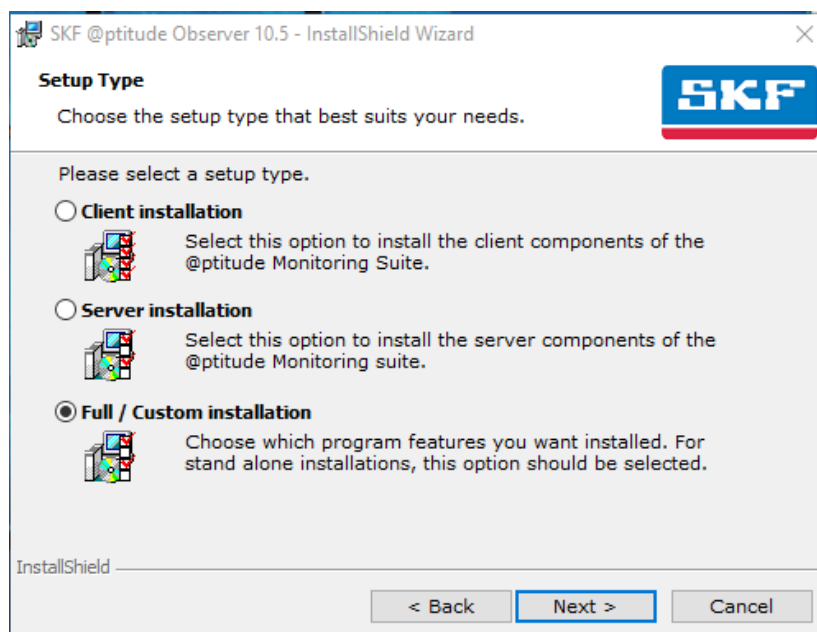
Příloha 2 Popis uživatelského rozhraní programu @ptitude Observer

Příloha 1 Postup instalace programu @ptitude Observer a následné připojení databáze.

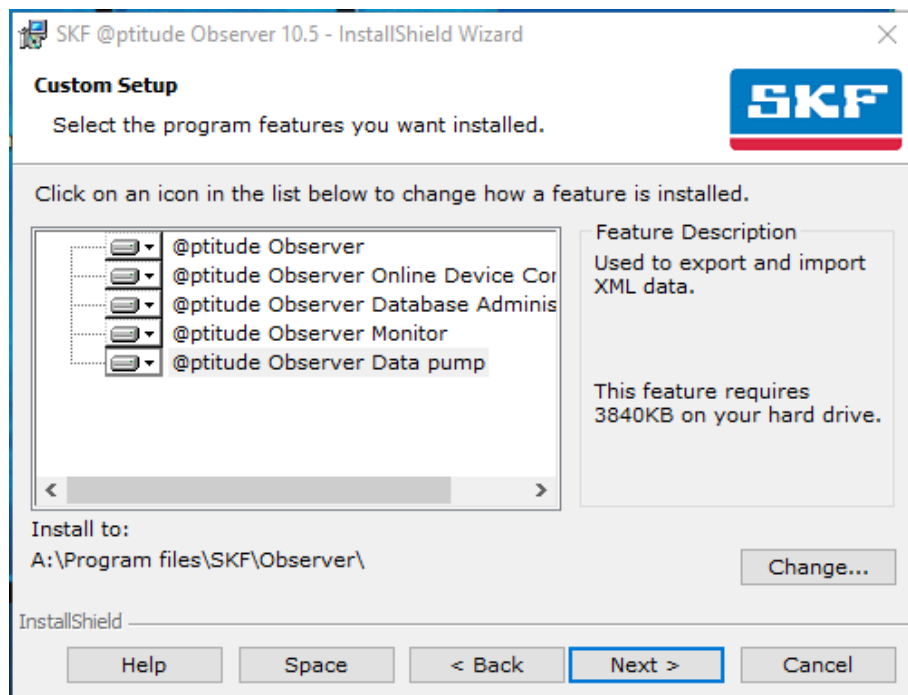
1. Spustíme instalační soubor.
2. Ze dvou nabízených možností instalace zvolíme první (@ptitude Observer).



3. V okně, které se zobrazí, zvolíme možnost „Install“.
4. Postupujeme dle pokynů instalačního průvodce („Next“, dáme souhlas s licenční smlouvou) a zvolíme cestu do složky, kam má být program nainstalován.
5. Z nabízených možností zvolíme „Full/Custom installation“.



6. Znovu máme možnost zvolit, které položky mají být nainstalovány a kam. Pokračujeme tlačítkem „Next“.



7. Stiskneme tlačítko „Install“.

8. Po úspěšném dokončení instalace ji můžeme ukončit tlačítkem „Finish“.

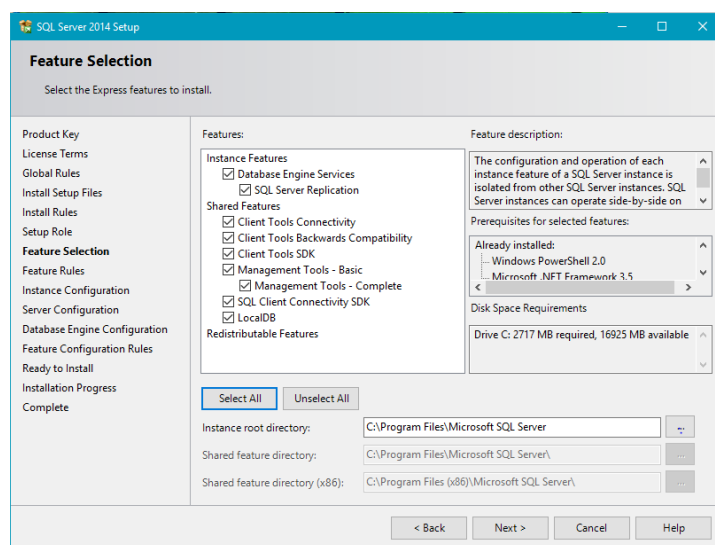
9. Následně se vrátíme na obrazovku z bodu 2. Nyní zvolíme druhou možnost (Microsoft SQL server).

10. V okně, které se zobrazí, zvolíme SQL Server Express 2014.

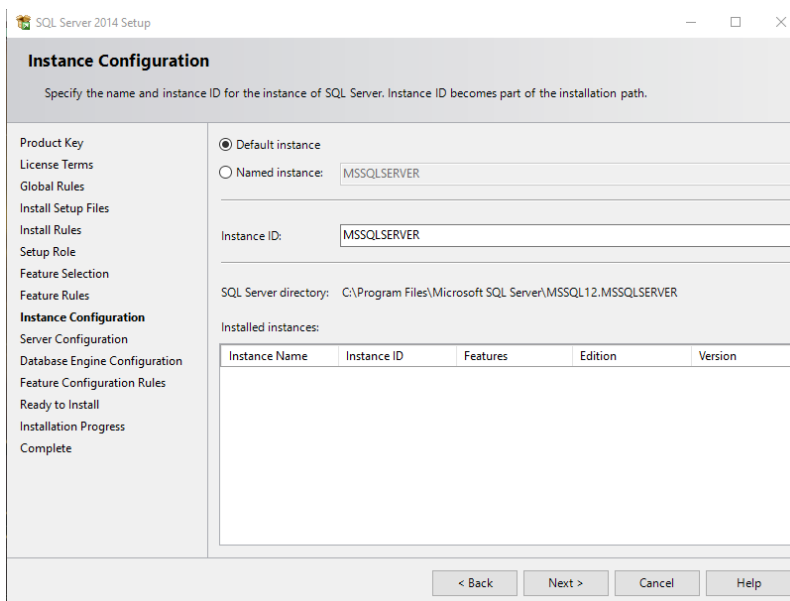
11. Vložíme produktový klíč (případně zvolíme edici zdarma – Express).

12. Opět postupujeme dle instalačního programu (souhlas s licencí, tlačítko „Next“).

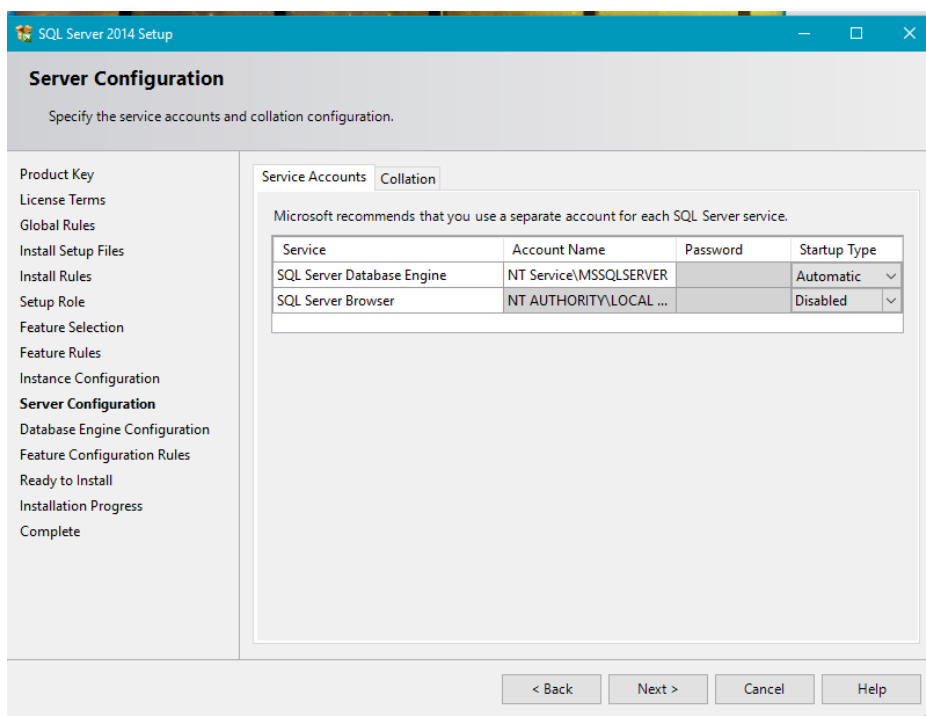
13. Pokračujeme až k části „Feature Selection“. Zde zvolíme všechny možnosti pomocí tlačítka „Select All“ a zvolíme, kam se budou části programu SQL server 2014 instalovat.



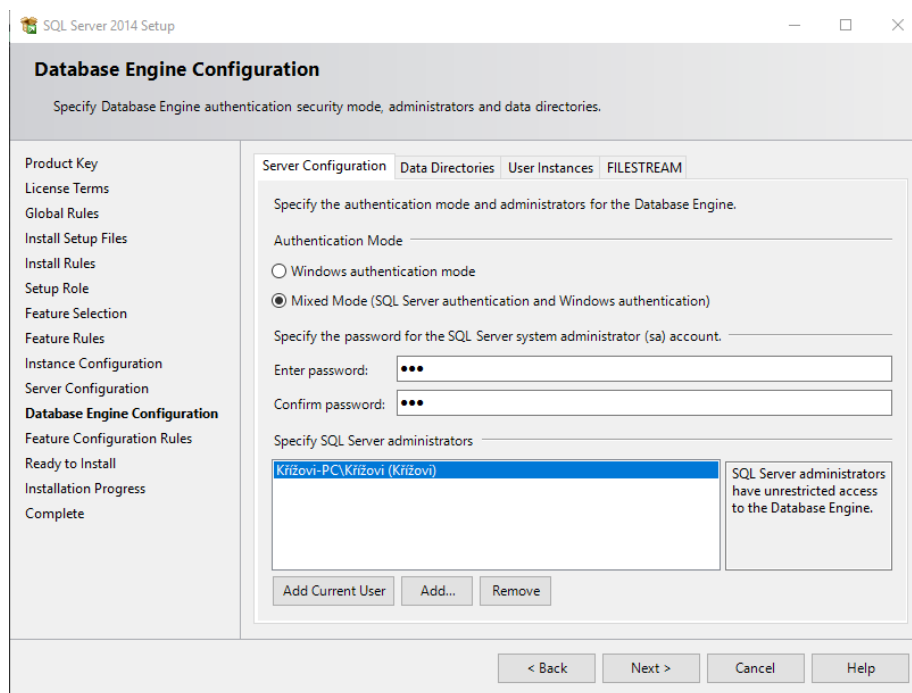
14. Následujícím oknem je „Instance Configuration“. Zde můžeme změnit „Instance ID“ (pokud jej změníme, bude se jmenovat jinak i složka, do které budeme později nahrávat soubory databáze).



15. V části „Server Configuration“ můžeme provést konfiguraci serverů. Po provedení případných změn pokračujeme dále.



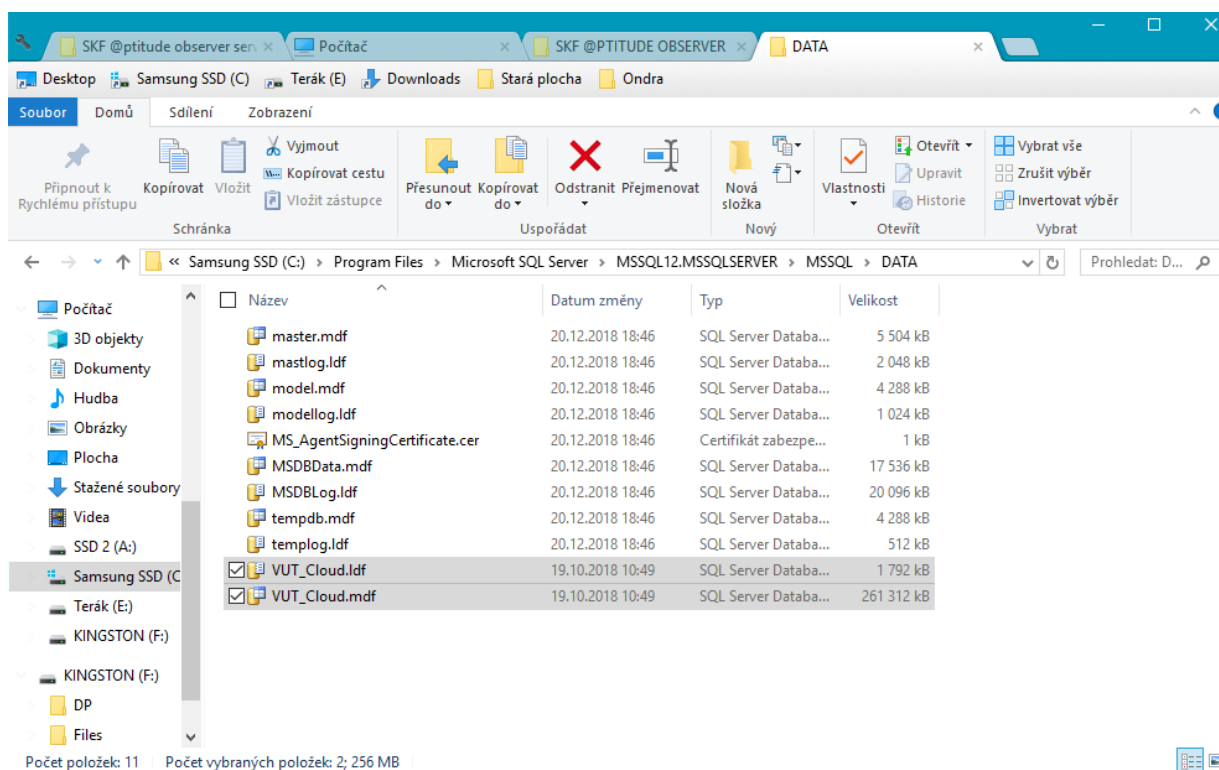
16. Následuje „Database Engine Configuration“. Zde můžeme konfigurovat „Database Engine“. Specifikujeme autentifikační mód (doporučena druhá možnost) a zadáme heslo pro účet sa (Server system administrator).



17. Pokračujeme dále dle pokynů instalačního programu, následně stiskneme „Install“.

18. Po úspěšném dokončení instalace můžeme instalační program zavřít.

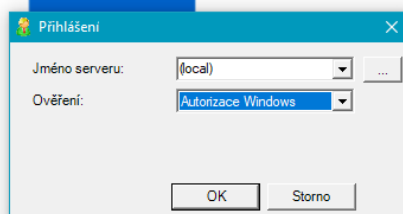
19. Nyní musíme připojit databázi. Pro to potřebujeme mít vytvořené 2 soubory (s příponami .ldf a .mdf). Tyto soubory nahrajeme do složky, kam jsme instalovali Microsoft SQL Server (např. C:\Program Files\Microsoft SQL Server\MSSQL12.MSSQLSERVER\MSSQL\DATA).



20. Nyní spustíme program @ptitude Observer Database Administrator (který jsme nainstalovali společně s programem @ptitude Observer). Zvolíme jazyk a přihlásíme se do programu (lze pomocí lokálního účtu).

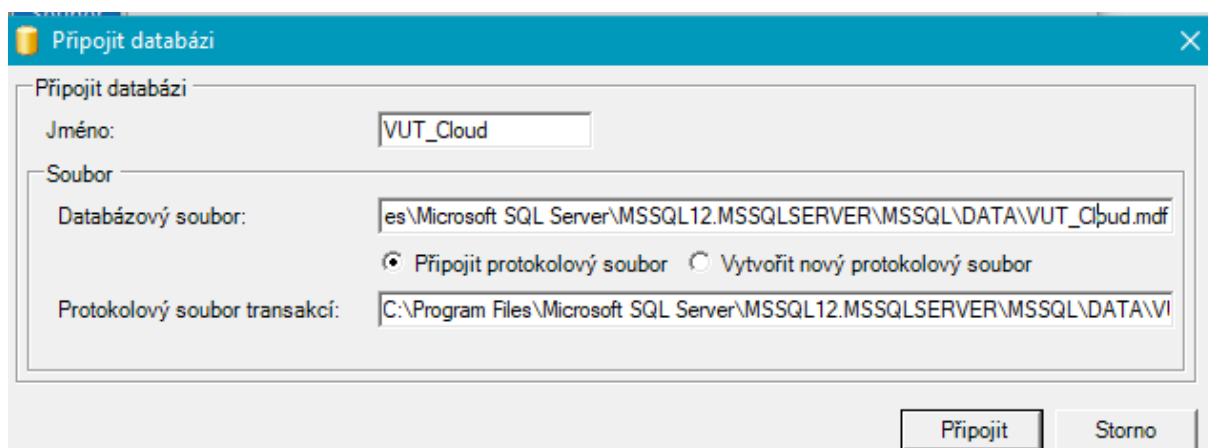


SKF @ptitude
Observer

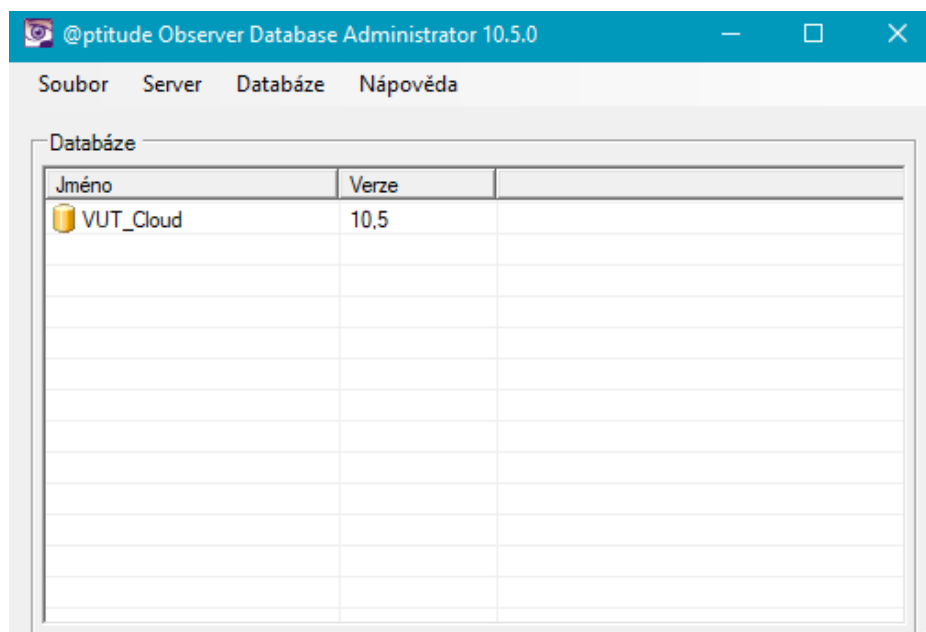


ude Observer
administrator

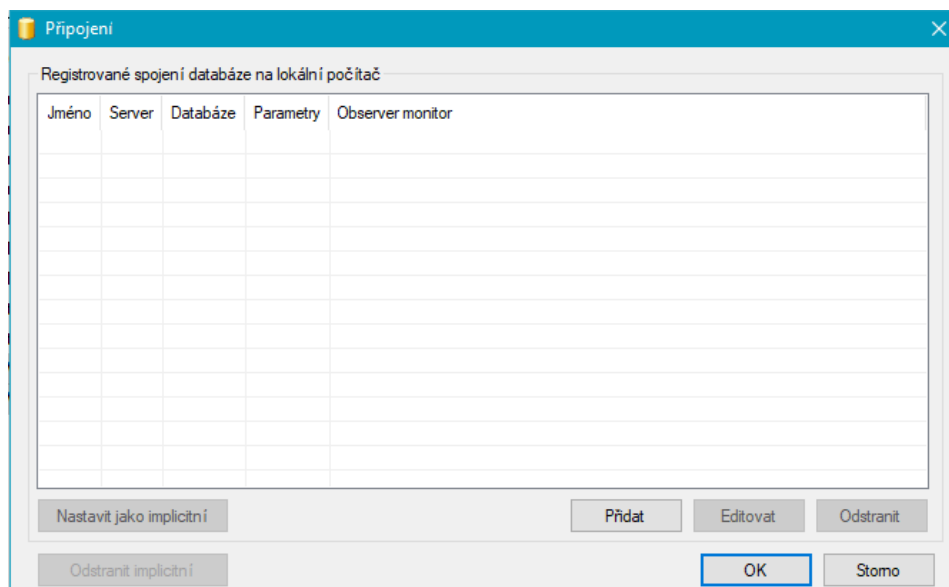
21. Pod záložkou „Server“ zvolíme možnost „Připojit databázi“ („Attach database“). Do kolonky „Jméno“ napíšeme stejné jméno, jaké mají dva soubory, které jsme vkládali do složky v bodu 19).



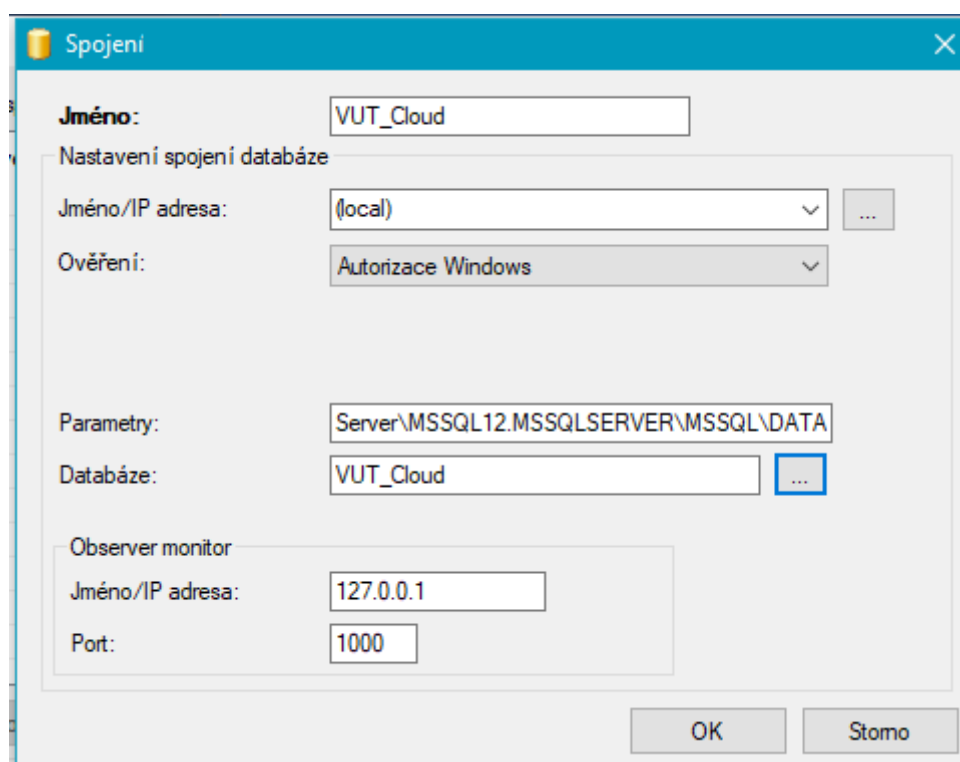
22. Stiskneme tlačítko „dokončit“. Databáze by se měla objevit v seznamu databází.



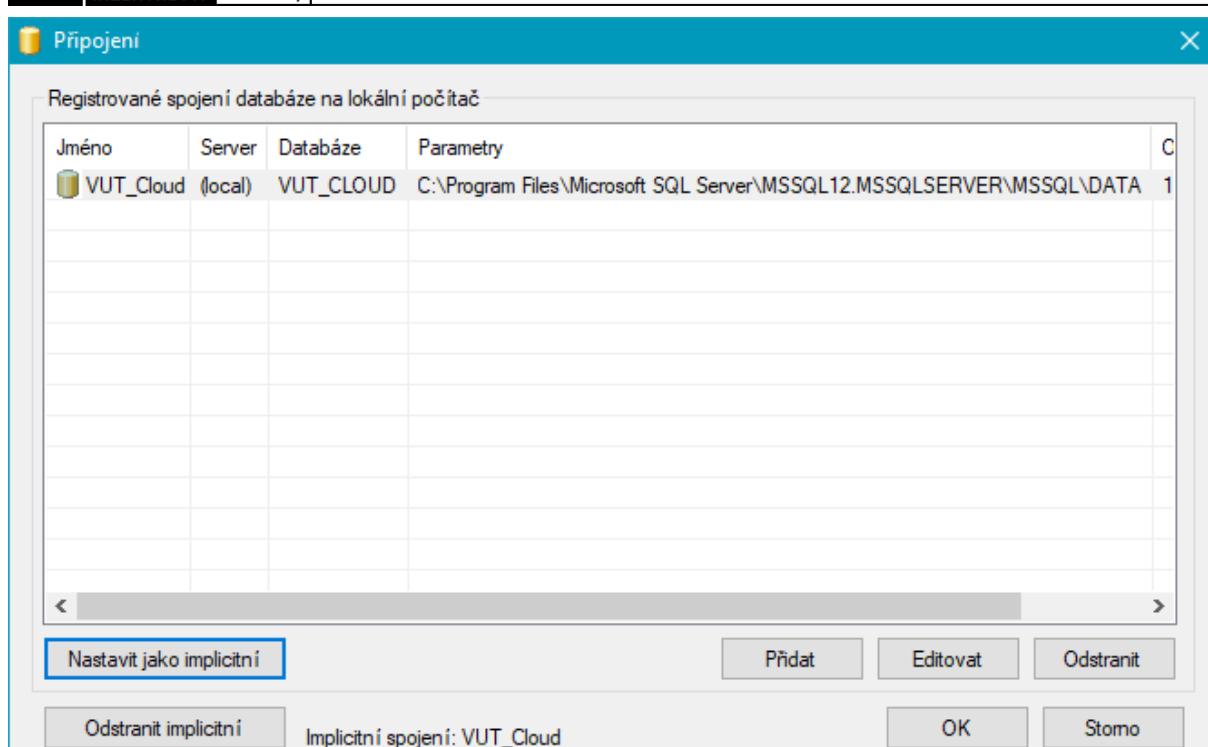
23. Database administrator můžeme zavřít a zapneme program @ptitude Observer. Zvolíme náš preferovaný jazyk a vložíme licenční číslo. Následně musíme přidat databázi. Pokračujeme tedy tlačítkem „Přidat“.



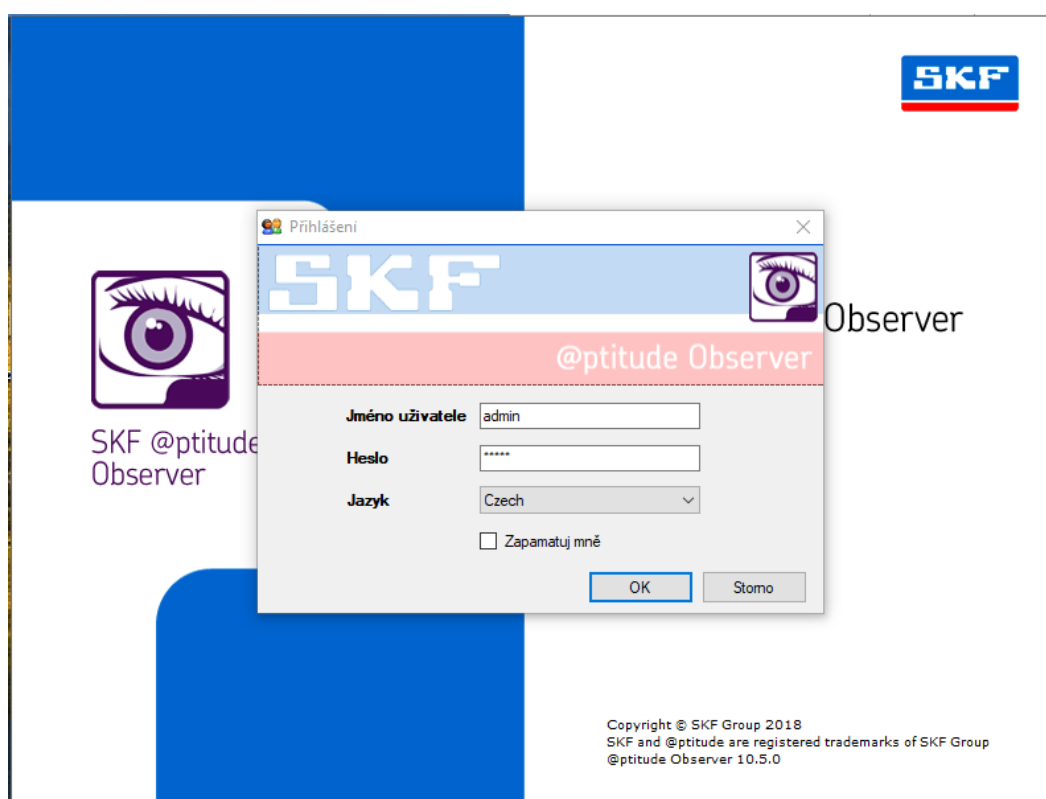
24. Na další obrazovce nastavíme detaily spojení. V našem případě jako jméno zvolíme VUT_Cloud, Jméno můžeme nechat jako (local) (při typu ověření „Autorizace Windows“). Jako parametr zvolíme cestu k souborům databáze z bodu 19. Následně ze seznamu databází vybereme tu, kterou chceme připojit (v našem případě VUT_Cloud). Následně do kolonky „Jméno/IP adresa“ napíšeme IP adresu a zadáme číslo portu.



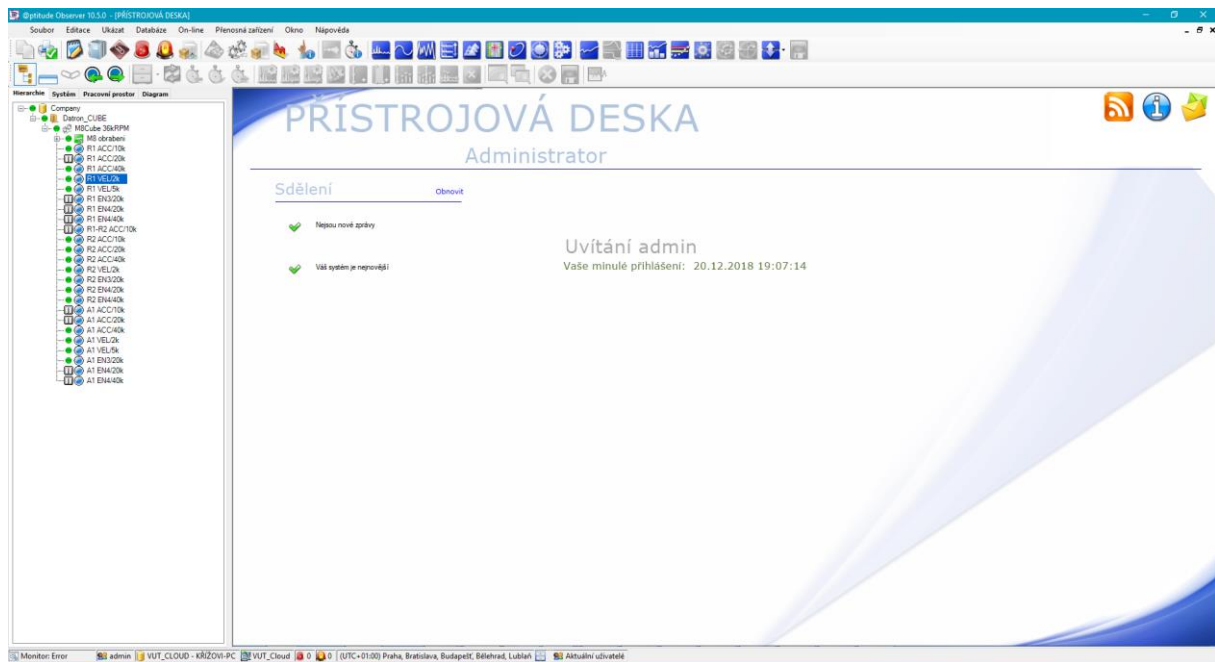
25. Nyní bychom měli naši databázi vidět v okně „Připojení“. Nastavíme ji jako implicitní (pomocí tlačítka „Nastavit jako implicitní“).



26. Potvrdíme stiskem tlačítka „OK“. Nyní se již můžeme přihlásit do programu @ptitude Observer.

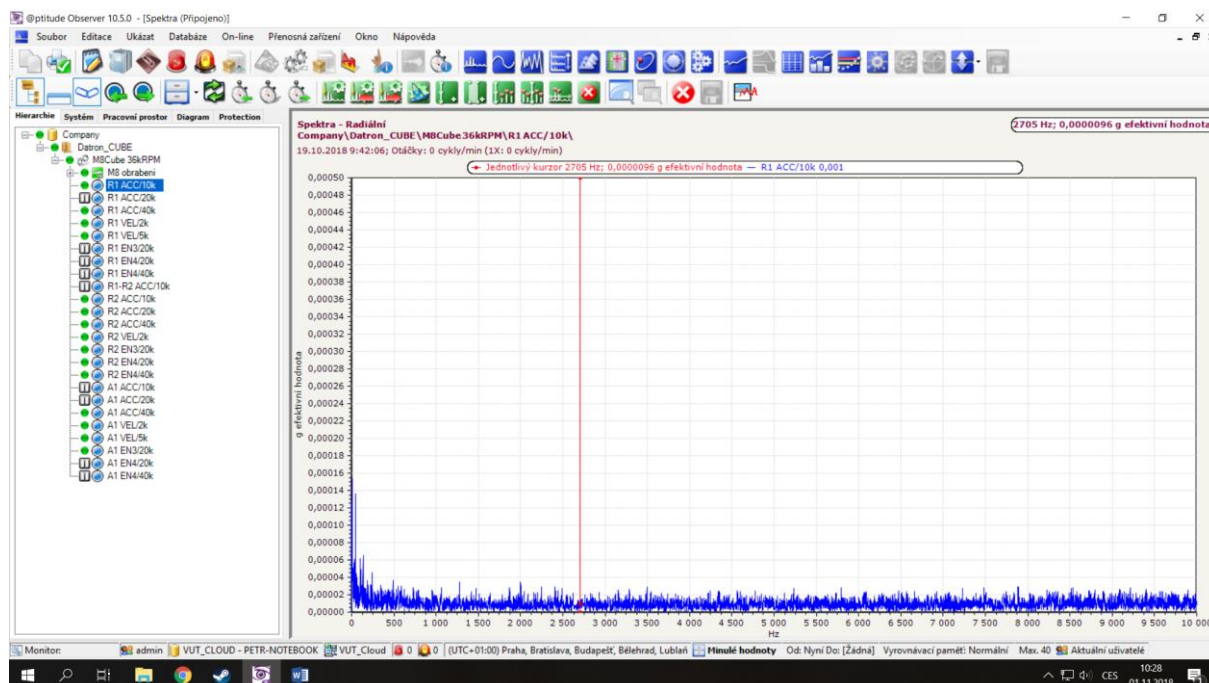


27. Hotovo. Můžeme začít práci v programu.

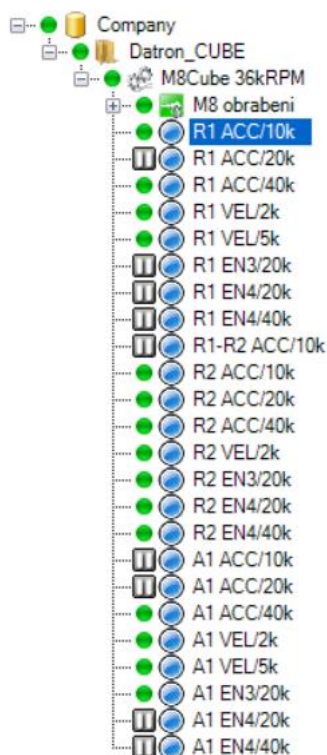


Příloha 2 Popis uživatelského rozhraní programu @ptitude Observer

Stručný popis rozhraní programu SKF @ptitude Observer. Zdroj – SKF @ptitude Observer manual.



Pohled na okno programu SKF @ptitude Observer 10.5.0



Pohled na hierarchii v programu @ptitude Observer 10.5.0



Popis:

- 1 – **Kopírovat aktivní okno do schránky** – Zkopíruje aktivní okno.
- 2 – **Tisk aktivního okna** – Vytiskne aktivní okno.
- 3 – **Poznámky** – Umožňuje přidávat nové poznámky, případně editovat již dříve vytvořené poznámky.
- 4 – **Případy událostí** – Umožňuje spravovat/vytvářet Případy událostí pro udržení stopy a dokumentové zprávy, informace a historii, týkající se specifické události vázané na specifický stroj.
- 5 – **Dokumenty** – Obdobné jako poznámka, ale připojí soubor (například .pdf soubor, textovou zprávu ve Wordu, případně MP3 soubor atd).
- 6 – **Systém. Poplach** – Ukazuje měření, které spadají mimo rozsah, a poplachy.
- 7 – **Seznam poplachů** – Při stisknutí tohoto tlačítka se zobrazí seznam poplachů pro zvolenou položku (označenou v hierarchickém stromu).
- 8 – **Přehled údržby** – Umožňuje prohlédnutí úkolů údržby (pokud jsou úkoly údržby nastaveny).
- 9 – **Přehled procesu** – HMI (Human Machine Interface) - Ilustruje aktuální stav stroje pomocí sloupců a procesních hodnot (pokud je konfigurován).
- 10 – **Části stroje** – Vytvoření modelu strojů (tyto modely mohou obsahovat hřídele, převodovky, ložiska atd.). Poté lze pomocí spočíst pro daný stroj např. specifické budící frekvence.
- 11 – **Plánovač údržby** – Umožňuje naplánovat úkoly údržby (výměny, mazání, zobrazit časový plán atd.).
- 12 – **Data miner** – (vyhledávač dat) Umožňuje porovnávat měřicí body, stroje nebo dokonce specifickou diagnózu mezi nimi.
- 13 – **Vlastnosti** – Otevře podokno „Vlastnosti“ u bodu, zvýrazněného v hierarchickém stromu.
- 14 – **Pohled na zachycenou událost** – Zobrazí všechny body, které jsou v Zachycené události k dispozici. Zachycená událost je událost, kterou můžeme zachytit ručně, nebo může být zachycena automaticky (pomocí poplachu). Tuto událost poté můžeme analyzovat.
- 15 – **Datum měření** – Zobrazí všechna měření ze zvoleného data.
- 16 – **Ukázat pohled na strom** – Zobrazí/skryje hierarchický strom v pravé části obrazovky.
- 17 – **Ukázat dolní podokno** – Zobrazí/skryje dolní podokno (ve kterém se zobrazují parametry stroje).

18 – **Spojení na hierarchii** – Aktivuje/Deaktivuje mód, ve kterém při zvolení jiného měřicího bodu se automaticky v aktivním okně zobrazí graf z tohoto měřicího bodu (pokud je možnost deaktivována, při zvolení jiného měřicího bodu zůstane otevřený původní graf).

19 – **Ukázat předchozí měřicí bod** – V hierarchii zvolí předchozí měřicí bod.

20 – **Ukázat další měřicí bod** – V hierarchii zvolí následující měřicí bod.

21 – **Vyrovňovací paměť** – Nastavení vyrovnávací paměti (použití pro filtrování dat, která mají být vyhledána).

22 – **Obnovit** – Vynutí obnovení (tj. aktualizaci) hierarchického stromu, systémového pohledu nebo pohledu na pracovní prostor.

23 – **Předchozí měření** – Zobrazí předchozí měření zvoleného měřicího bodu.

24 – **Vybrat datum měření** – Pomocí tohoto rozhraní lze zvolit datum, ze kterého se následně zobrazí měření (pro zvolený měřicí bod).

25 – **Další měření** – Zobrazí následující měření zvoleného měřicího bodu.

26 – **Frekvence závad** – Zde lze zvolit strojní části, které jsou právě analyzovány. Jejich frekvence jsou následně vykresleny v grafu.

27 – **Předchozí závadová frekvence** – Posune aktivní kurzor na předchozí strojní část.

28 – **Další závadová frekvence** – Posune aktivní kurzor na následující strojní část.

29 – **DiagX** – Pro zvolenou frekvenci zobrazí možné strojní části, k nimž může vybraná frekvence (včetně harmonických) patřit.

30 – **Jednotlivý kurzor** – Přidá do grafu jednotlivý kurzor (kterým lze označit jedna konkrétní frekvence).



31 – **Spektra** – Pro zvolený měřicí bod zobrazí graf spektra, který ukazuje amplitudu vibrací (pro zrychlení (m/s^2 nebo g), rychlost (mm/s nebo ips – inch per second, palec za sekundu) nebo výchylku (μm nebo mils - 1/1000 palce)) jako funkci frekvence.

32 – **Časová vlna** – Pro zvolený měřicí bod zobrazí graf s časovou vlnou, který ukazuje velikost vibrací jako funkci času.

33 – **Fáze** – Pro zvolený měřicí bod zobrazí graf s fázovým spektrem, který ukazuje fázi v závislosti na frekvenci. Pokud probíhá synchronní měření více bodů, lze určit fázové vztahy (tj. o kolik se zpožďují) mezi jednotlivými body.

34 – **Historie** – Zobrazí předchozí měření pro zvolený měřicí bod. Tím lze vizualizovat změny stroje za určitý čas. Zobrazit lze historie amplitudového spektra, fázového spektra, časové vlny, případně kombinace těchto grafů.

35 – **3D graf** – Pro zvolený měřicí bod vygeneruje kaskádové zobrazení (3D graf). Ten znázorňuje spektra nebo obálky jako funkci času, otáček hřídele, výkonu, kroutícího momentu, teploty, případně jiného parametru.

36 – **Topologie** – Pro zvolený měřicí bod generuje topologické zobrazení. To ukazuje závislost frekvence na čase nebo otáčkách (amplituda je kódována barevně). Jinak řečeno je to obdoba 3D grafu, ale pohled na data je shora.

37 – **Orbita** – Pro zvolený měřicí bod (dvou nebo tříkanálový) zobrazí orbitu. Tak lze analyzovat např. pohyb hřídele.

38 – **Profil** – U zvoleného měřicího bodu zobrazí profil. Ten využívá data spouštěného časového signálu zrychlení, aby zobrazil neokrouhlost kruhového objektu.

39 – **Inspektor ozubení** – U zvoleného měřicího bodu generuje displej s inspektorem ozubení, což je technika sběru dat, která vizualizuje impulzní energii jako funkci otáček hřídele/ozubeného kola.

40 – **Trend** – Pro zvolený měřicí bod zobrazí trend dat (např. amplitudy, fáze atd.) jako funkci času, otáček, případně i dalších procesních dat (lze nastavit i „nic“, což zobrazí graf s daty v pořadí, v jakém byly sejmuty – na rozdíl od možnosti „čas“, která zachová v grafu rozestupy, se kterými byly hodnoty naměřeny).

41 – **Bode graf** – U zvoleného měřicího bodu vygeneruje Bode graf (ten ukazuje amplitudu/fázi vibrací nebo jiná procesní data jako funkci otáček – je tedy identický s grafem trendu, u kterého by byly osy nastaveny takto).

42 – **Seznam trendů** – Vygeneruje displej se seznamem trendu pro zvolený (v hierarchii) měřicí bod.

43 – **Vícenásobný trend** – Pro zvolený měřicí bod zobrazí displej s vícenásobným trendem. Ten oproti klasickému grafu trendu nabízí možnost překládat přes sebe data z různých měřicích bodů/zdrojů.

44 – **Diagnóza** – Pro zvolený měřicí bod otevře diagnostický displej (zde lze zobrazit a sledovat vývoj závad strojů).

45 – **Protean** – Spustí diagnostiku Protean (nástroj k zobrazení indikátorů stavu stroje).

46 – **Polární** – Toto tlačítko zobrazí vibrační signál v komplexní rovině (pro násobky otáček hřídele 1x, 2x, 3x a 4x).

47 – **Osa hřídele** – Zobrazí pro daný měřicí bod polohu osy hřídele.

48 – **Kombinované grafy** – Pro daný měřicí bod zobrazí kombinované grafy (ty ukazují 2 nebo více typů diagramů ze stejného měření) – např. spektrum/časová vlna, trend/spektrum/časová vlna atd.

49 – **Save settings** – Uloží změny provedené v nastavení grafu (např. nastavení stupnice atd.).

50 – **Pásmo** – Přidá do grafu kurzor (obdobně jako bod 30), ale v tomto případě je kurzor pásmový (lze upravit jeho velikost i umístění).

51 – **Harmonické** – V grafu pro daný měřicí bod vytvoří harmonický kurzor pro aktuálně vybranou frekvenci.

52 – **Postranní pásma** – V grafu pro daný měřicí bod vloží na vybraný bod značku X a pod i nad značku X označí pět postranních pásem.

53 – **Amplitudové špičky** – V grafu zobrazí kurzorem největší špičky.

54 – **Vymazat** – Vymaže z grafu všechny kurzory, nástroje a případné další značky, které byly přidány.

55 – **Zoom** – Po stisknutí je třeba vyznačit oblast v grafu. Následně bude provedeno zoomování (přiblížení) grafu.

56 – **Zrušení zoomu** – Vratí přiblížený graf zpět do původní velikosti.

57 – **Vymazat** – Vymaže dané měření z databáze (spektrum, časová vlna i fáze jsou brány jako jedno měření, takže jsou vymazány společně).

58 – **Uložit** – Ručně uloží aktuální měření z grafu do databáze (standardně se měření ukládá pouze v definovaných intervalech).

59 – **Živý** – (pouze pokud je spojení mezi jednotkou IMx a @plitude Observer Monitorem) Okamžitě přečte data z měřicího bodu (případně měřících bodů) a zobrazí je v grafu.